

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.

VICERECTORIA DE DOCENCIA.

ESCUELA DE CIENCIAS E ING. DE LOS MATERIALES.



MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

DE LA EMPRESA INDUSTRIAS VARIAS

NACIONALES (INVANAL).

PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

BACHILLER EN INGENIERÍA METALÚRGICA.

PRESENTADO POR:

YURY RODOLFO TOME MARINCOVICH.

CARTAGO.

II SEMESTRE 2006.

Dedicatoria:

***A DIOS todo poderoso por
Permitir que alcanzara esta meta.***

A mi familia.

***Y a todas aquellas personas
de noble corazón, tanto dentro
como fuera de la institución, que
pusieron su granito de arena de
para que lograra la meta
hoy alcanzada.***

Agradecimientos:

Expreso mi agradecimiento a mi familia por su apoyo. A toda la institución en general, pero en especial a todo el personal de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, tanto al personal docente, técnico del taller y administrativo, a todos, muchas gracias por su apoyo, paciencia y comprensión. Al personal de la biblioteca, soda comedor, seguridad, conserjería, trabajo social, orientación y psicología, enfermería, registro, financiero, LAIMI, FEITEC y ASEMET, a todos muchas gracias por su excelente trato y por su apoyo en los momentos difíciles. Al señor Efraín Ruiz y a la señora Clara Rosa de Ruiz, gracias por su paciencia, apoyo y comprensión.

Al señor Renzo Castro gerente general de la empresa Industrias Varias Nacionales (INVANAL) por permitirme realizar mi práctica de especialidad en las instalaciones de su empresa, a los señores Darío Machado, Carlos Serna Basán, gracias por sus sabios consejos y sugerencias, en general, a todos mis compañeros de trabajo, a todos muchas gracias por enriquecer mi vida profesional.

A los señores Ricardo Mata Padre e hijo por permitirme la utilización de los equipos de la empresa Fundiciones y Maquinado (FUNYMAQ) muchas gracias por sus consejos y sugerencias. Al señor José Solano Director de la división de mecánica industrial del Instituto de Formación Profesional (INFOP) por permitirme el uso de los equipos para las pruebas de mi práctica, al señor Fidel Banegas instructor del curso de tratamientos térmicos y soldadura de INFOP por su supervisión en el uso de los equipos de laboratorio, gracias por sus consejos, sugerencias y el préstamo de libros y manuales.

Al señor Fredy Hernández director del departamento de matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán (UNPFM), gracias por su asesoría y por el préstamo de los manuales y libro de la American Society for Materials (ASM).

Al señor Francisco Barralága director de la escuela de física de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) por su atención durante la visita a dicha universidad.

A todos muchas gracias y que DIOS los bendiga.

JURADO EVALUADOR.

MSC. Galina Pridybailo Chekan.

MSC. Oscar Chaverri Quiróz.

Ing. William Benavides Ramírez.

Profesor Guía

Contenido:	Página.
Índice.	5
Listado de figuras.	8
Listado de Tablas.	10
Listado de esquemas.	11
Índice:	
<u>Capítulo 1: Introducción.</u>	12
1.1. Conocimiento del proyecto.	12
1.2. Justificación.	13
1.3. Problema de investigación.	14
1.4. Antecedentes.	15
1.5. Estado de la cuestión.	16
1.6. Objetivos.	17
<u>Capítulo 2: Marco teórico.</u>	19
2.1. Metalurgia experimental.	19
2.1.1. Hornos para tratamientos térmicos.	20
2.1.2. Medición de durezas.	31
2.1.3. Metalografías.	47
2.2. Tratamientos térmicos del acero.	60
2.2.1. Generalidades de los tratamientos térmicos.	60
2.2.2. Proceso de temple.	89
2.2.3. Proceso de revenido.	96
2.2.4. Proceso de cementado.	100

	Página.
<u>Capítulo 3: Marco metodológico.</u>	104
3.1. Introducción.	104
3.2. Materiales y equipos utilizados.	105
3.3. Procedimientos de caracterización de los aceros investigados.	117
3.4. Resultados y observaciones.	124
3.5. Implementación del proceso de cementado en caja.	134
<u>Capítulo 4: Análisis de problemática actual y soluciones.</u>	138
4.1. Introducción.	138
4.2. Piezas que nunca se endurecen al templarse.	139
4.3. Piezas de un mismo material, que producen diferentes resultados de dureza después de ser tratadas (temple y revenido).	139
4.4. Piezas que después de se tratadas no presentan una dureza uniforme a lo largo de su superficie.	141
4.5. Piezas que se agrietan durante el temple.	142
4.6. Piezas que después de ser tratadas (temple y revenido), fallan prematuramente cuando están en servicio dentro de una máquina.	145
4.7. Algunos comentarios importantes.	156
<u>Capítulo 5: Discusión de resultados de las pruebas.</u>	160
<u>Capítulo 6: Conclusiones.</u>	184
<u>Capítulo 7: Recomendaciones.</u>	186
<u>Bibliografía.</u>	187

	Página.
Apéndice.	188
Sección A: Hoja de registro de procesos de tratamientos térmicos.	189
Sección B: Fotos de los equipos usados.	190
Sección C: Diseño de un sistema de enfriamiento y agitación del baño de aceite.	192
Sección D: Diseño de un medidor de dureza por rebote de balón.	194
Sección E: Manual de procedimientos.	198

Lista de figuras.

Página.

Figura 2.1: Partes constitutivas de los hornos.	24
Figura 2.2: Horno de cámara o mufla.	26
Figura 2.3: Horno de crisol.	26
Figura 2.4: Elementos de un sistema de control de temperaturas.	27
Figura 2.5: Esquema de un termopar.	28
Figura 2.6: Tubo de protección o termocupla.	28
Figura 2.7: Pirómetro termoelectrico simple.	29
Figura 2.8: Pirómetro termoelectrico automatico.	30
Figura 2.9: Ensayo Rockwell B (HRB).	33
Figura 2.10: Ensayo Rockwell C (HRC).	34
Figura 2.11: Escalas de ensayo Rockwell.	34
Figura 2.12: Ensayo Brinell (HB).	36
Figura 2.13: Ensayo Vickers (HV).	40
Figura 2.14: Huella impresa del ensayo Vickers.	40
Figura 2.15: Relación entre espesores mínimos – dureza y carga aplicada.	42
Figura 2.16: Partes constituyentes del medidor de durezas.	43
Figura 2.17: Mecanismo de aplicación de cargas.	45
Figura 2.18: Soporte y elevador de cargas.	46
Figura 2.19: Dispositivos de indentación.	46
Figura 2.20: Aparato de medición y de lectura.	46
Figura 2.21: Cortadora de muestras.	48
Figura 2.22: Máquina para desbaste grueso.	49
Figura 2.23: Prensa para montaje de muestras.	49
Figura 2.24: Cámara cilíndrica de la prensa.	50
Figura 2.25: Disipador de calor de aluminio.	50
Figura 2.26: Muestras o probetas en resina.	51
Figura 2.27: Rejillas para desbaste fino.	51
Figura 2.28: Procedimiento de desbaste fino.	52
Figura 2.29: Giros durante el desbaste.	52
Figura 2.30: Equipo para pulido fino.	53
Figura 2.31: Banco metalográfico.	56
Figura 2.32: Banco metalográfico computarizado.	56
Figura 2.33: Micrografías de muestras de un acero de bajo carbono y del hierro puro.	57

Lista de figuras (continuación).

Página.

Figura 2.34: Relación Estructura – propiedad – proceso.	60
Figura 2.35: Niveles de estructuras de los materiales.	61
Figura 2.36: Relación estructura – propiedad – proceso para temple, revenido y cementación.	64
Figura 2.37: Diagrama de Hierro – Carbono.	75
Figura 2.38: Región de aceros del diagrama de hierro carbono.	76
Figura 2.39: Principales estructuras cristalinas formadas en el acero durante solidificación.	77
Figura 2.40: Estructuras en la que se aprecian las diferentes fase en equilibrio del acero.	78
Figura 2.41: Fases en estado de no equilibrio.	83
Figura 2.42: Estructuras en estado de equilibrio y no equilibrio.	85
Figura 2.43: Diagrama temperatura del proceso de recocido ejecutado en taller.	89
Figura 2.44: Gráfico dureza en función del contenido de carbono para aceros de bajo carbono y aleados.	89
Figura 2.45: Duración del mantenimiento en el temple.	92
Figura 2.46: etapas del enfriamiento.	94
Figura 2.47: Curva de revenido del acero 4140.	97
Figura 2.48: Curva de isodureza del acero 4140.	99
Figura 4.1: Tanque con aceite que actualmente se usa en INVANAL.	141
Figura 4.2: Termopar dañado.	143
Figura 4.3: Pirómetro antiguo.	144
Figura 4.4: Pirómetro nuevo.	144
Figura 4.5: Engranaje roto por medidor de temperatura descalibrado.	146
Figura 4.6: Muestra y engranaje inadecuadamente templado.	148
Figura 4.7: Cuchilla de troquel de poca tenacidad y mal alineada.	151
Figura 4.8: Acople que se agrietó por segundo temple sin previo alivio de tensiones.	152
Figura 4.9: Cojinete templado y cementado.	155
Figura 4.10: Curva de tiempo de calentamiento del horno.	157
Figura 4.11: Engranaje de acero F – 1140 (1045) templado incorrectamente.	159

Lista de tablas.

Página.

Tabla 2.1: Cargas y materiales de aplicación del ensayo Brinell.	38
Tabla 2.2: Conversión de durezas aproximadas.	42
Tabla 2.3: Reactivos para examen microscópico.	54
Tabla 2.4: Clasificación y composición de los aceros SAE.	69
Tabla 2.5: Equivalencias de aceros al carbono SAE / AISI. Barras laminadas en caliente.	69
Tabla 2.6: Equivalencias de aceros resulfurados SAE / AISI.	71
Tabla 2.7: Equivalencias de aceros aleados SAE / AISI.	71
Tabla 2.8: Equivalencias de aceros al Boro SAE / AISI.	72
Tabla 2.9: Coeficientes de forma “k” para cálculo de tiempos de mantenimiento para diferentes piezas.	91
Tabla 2.10: aplicaciones típicas de la carburación en caja.	103
Tabla 3.1: Normas equivalentes aproximadas de los aceros caracterizados.	106
Tabla 3.2: Composición química aproximada de los aceros caracterizados.	106
Tabla 3.3: Características aproximadas de tratamientos térmicos de los aceros caracterizados según catálogos de fabricantes.	107
Tabla 3.4: Conversiones de la escala Rockwell C a otros valores de dureza.	110
Tabla 3.5: Conversiones de la escala Rockwell B a otros valores de dureza.	113
Tabla 3.6: Rangos de temperaturas seleccionados para los aceros templados.	119
Tabla 3.7: Rangos de temperaturas para temple de los aceros previo al proceso de revenido.	121
Tabla 3.8: Rangos de temperatura de revenido de los aceros revenidos.	123
Tabla 3.9: Durezas de aceros en estado de suministro.	124
Tabla 3.10: Durezas de aceros en bonificados que fueron recocidos.	124
Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple de diferentes aceros a distintas temperaturas.	125
Tabla 3.12: Dureza de pruebas de temple previo al revenido de diferentes aceros a distintas temperaturas.	130
Tabla 3.13: Durezas del revenido de diferentes aceros a distintas temperaturas.	130
Tabla 3.14: Resultados de dureza de la pruebas de cementado en caja.	137

Listado de esquemas**Página.**

Esquema 2.1: Hornos para tratamientos térmicos.

23

Esquema 2.2: Propiedades de los materiales.

62

Esquema 2.3: Procesos de manufactura.

63

Esquema 2.4: Procesos de tratamientos térmicos.

66

Capítulo 1: Introducción.

1.1. Conocimiento del proyecto.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar el área de tratamientos térmicos de la empresa Industrias Varias Nacionales (INVANAL), la realización de este esfuerzo tiene los objetivos principales de generar un beneficio a la empresa INVANAL mediante el desarrollo de una metodología de trabajo que permita resolver de forma óptima la problemática actual que se presenta en los diferentes procesos de tratamientos térmicos que se realizan en la empresa, y el de permitir a este su servidor, el prestar un adecuado servicio mediante el desarrollo de las destrezas adquiridas, tanto por conocimiento académico aprendido en el aula de clase; así como por el trabajo práctico realizado en el taller de la escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Actualmente, en la empresa se realizan solo los tratamientos térmicos de temple y revenido para elementos de máquinas tales como tornillos, tuercas, engranajes, Cojinetes, acoples y elementos para la construcción de troqueles tales como cuchillas, pines o punzones, bases para troquel y porta punzones.

La realización de estos procesos forman parte de los servicios que presta la empresa, cuando se fabrican por mecanizado elementos de máquinas ya sea para el ensamble de una máquina nueva, o cuando se reparan dichos elementos de una máquina para recuperar la misma. En la realización del proceso de temple y revenido se presentan ciertos problemas que inciden negativamente en la calidad del producto terminado, por lo que se debe investigar las causas que generan dichos problemas con el fin de evitarlos, se espera que con este esfuerzo planificado, se logre los objetivos del presente proyecto, así como de contribuir con el desarrollo de una metodología de trabajo para la empresa generando un importante valor agregado, el cual es llamado conocimiento.

1.2. Justificación:

Todo trabajo que se proyecte en la industria, requiere de una inversión inicial, por lo que para realizarse dicha inversión, debe justificarse por si mismo para que pueda considerarse factible, por lo que se hace necesario explicar cual es la razón del presente trabajo.

La empresa INVANAL tiene la expectativa de mejorar el área de tratamientos térmicos con miras a brindar un mejor servicio de manera tal que se fabriquen piezas mecánicas de mejor calidad para la industria, esto con el fin de aumentar el buen prestigio que ya tiene la empresa y así incrementar el número de clientes para generar mayores ganancias, para lograr esto, se debe investigar las causas que generan las fallas actuales en los procesos de tratamientos térmicos para aplicar las medidas correctivas con el fin de sistematizar para optimizar los procedimientos realizados de tratamientos térmicos.

Una vez que se encuentren las causas y se corrijan, se procederá a redactar un manual de procedimientos para sistematizar los procesos de manera tal que se puedan realizar los procesos de temple y revenido con la mayor eficiencia manteniendo así, un balance adecuado entre costo y calidad de producto terminado.

Por otro lado también, esta empresa tiene la expectativa de ampliar los servicios de tratamientos térmicos, es decir, implementar nuevos servicios a la industria tales como el tratamiento térmico de carburización sólida o cementación en caja. Esta empresa también tiene la necesidad de implementar nuevos servicios a parte de los tratamientos térmicos, servicios tales como el galvanizado en caliente de piezas en general.

En este trabajo, para los procesos de temple y revenido se investigará las causas que producen problemas en la calidad de las piezas y para el proceso de carburización sólida o cementación en caja, se buscará implementarlo de manera tal que la empresa pueda ofrecer un nuevo servicio a la industria.

1.3. Problema de investigación:

Los problemas a investigar en los procesos de tratamientos térmicos de temple y revenido que se efectúan en la empresa son los siguientes:

- Piezas que cuando se templan nunca se endurecen.
- Piezas de un mismo material, producen diferentes resultados de dureza después de ser tratadas.
- Piezas que después de ser tratadas no presentan una dureza uniforme a lo largo de toda su superficie.
- Piezas que se agrietan durante el temple.
- Piezas que después de bonificada (templada y revenida), fallan prematuramente cuando entra en operación dentro de una máquina.

Para cada punto anteriormente mencionado, se debe determinar a que materiales (aceros) específicamente les sucede el problema, también se debe determinar el comportamiento de los medios de enfriamientos para ver como afectan en los procesos, se debe verificar el procedimiento que actualmente se realiza para ver si hay relación con los problemas mencionados anteriormente.

Se debe estudiar cada una de la variables del proceso de temple y revenido (temperatura, dureza, tiempo, medio de enfriamiento y velocidad de enfriamiento) para ver si contribuyen o no, a los problemas que se presentan actualmente en los procesos, se debe caracterizar los diferentes aceros que se usan en el taller para medir la precisión de los equipos y para generar una base de datos de manera tal que se pueda sistematizar los procedimientos de tratamientos térmicos (temple y revenido) para evitar que susciten los problemas anteriormente dichos.

También se debe hacer pruebas de los aceros que se utilizan en el taller y que son aptos para la carburización, esto para poder implementar el proceso de carburación sólida (cementación en caja) en forma sistemática de manera tal que pueda realizarse eficientemente.

1.4. Antecedentes.

La empresa INVANAL no tiene un registro de las piezas que se han tratado térmicamente, tampoco se han hecho estudios o trabajos sobre piezas defectuosas, por lo que tampoco hay resultados registrados sobre las mismas. A nivel teórico, tienen mucha información de tratamientos térmicos, esta información la tienen en varios manuales los cuales son “Machinery’s Handbook”, “manual universal de tecnología mecánica” (el cual parece ser una traducción al español del primero), “el manual del ingeniero mecánico” y otros.

Como no se tiene registro escrito se solicitó información verbal a las personas que tienen más contacto con el área de tratamientos térmicos, para registrar por escrito los detalles de los problemas que se presentan cuando se realizan los procesos de tratamientos térmicos, las pesquisas realizadas indican que los problemas que se presentan en el área de tratamientos térmicos son los problemas que se habían mencionado en la sección tres del presente trabajo (el problema de investigación).

Debido a que no existen registros por escrito de los procesos descritos, se tomó la decisión de confeccionar una hoja de registro que permita llevar un control paso a paso, de las piezas que se van a tratar térmicamente, esto con el fin de ordenar los procedimientos de trabajo, esta hoja puede observarse en la sección A del apéndice. De la información que se recopiló se supo que la frecuencia con la que las piezas se dañan durante los tratamientos térmicos es baja, en la empresa se hace poco tratamiento térmico, pero dentro de lo que se hace, la frecuencia con que se dañan las piezas o dan los problemas que mencionamos anteriormente, es bastante baja.

Sin embargo, a pesar de esa baja frecuencia, es necesario investigar las posibles causas que producen fallos en los tratamientos térmicos para evitar así obtener pérdidas por piezas mal procesadas ya que si las piezas fallan por alguna razón, producen pérdida de tiempo, material, energía y dinero, lo que no es bueno para la empresa, con mayor razón, se debe sistematizar los procesos de tratamientos térmicos si se quiere producir piezas de buena calidad.

1.5. Estado de la cuestión.

En este momento, el área de tratamientos térmicos de la empresa cuenta con los siguientes equipos:

- Un solo horno eléctrico de mufla para temple y revenido en buen estado.
- Un recipiente con aceite para temple en buen estado.
- Un par de cubetas de plástico para temple en agua en buen estado.
- Un cepillo metálico eléctrico en buen estado.
- Un esmeril eléctrico con piedras carburadas en buen estado.
- Una prensa de banco grande y una pequeña en buen estado.
- Un medidor de dureza en reparación.

La empresa INVANAL no tiene equipo para análisis metalográfico, aunado a eso, el alto costo de dichos equipos, ha hecho necesario para INVANAL, solicitar a la empresa fundiciones y maquinado (FUNYMAQ) y al Instituto de formación Profesional (INFOP) el préstamo de dichos equipos junto con el equipo para medición de dureza debido a que el equipo de la empresa INVANAL está en reparación, por fortuna, estos equipos fueron prestados. Por esta razón se estará visitando ésta empresa y este instituto cuando se deba medir los resultados de las piezas que se caracterizarán para los procesos de tratamientos térmicos. Inicialmente, el horno de mufla eléctrico para temple y revenido estaba funcionando pero tenía problemas con la lectura de temperaturas, había una diferencia alrededor de 200 °C, es decir, cuando el horno se programaba con la perilla a 800 °C, la lectura real era 1000 °C, lo que producía problemas a la hora de hacer tratamientos térmicos.

Luego, el medidor de perilla se dañó y se cambió por otro medidor digital, el cual, por las pruebas preliminares que se han hecho; se ha podido confirmar que funciona bien, se han templado piezas y no se han presentado problemas, este equipo fue instalado por el electricista de INVANAL con la ayuda de su servidor.

1.6. Objetivos.

Para esta práctica de especialidad, se tienen los siguientes objetivos:

1.6.1. Objetivos generales:

1.6.1.1. Proponer las soluciones más adecuadas a los problemas que actualmente se presentan en el área de tratamientos térmicos.

1.6.1.2. Generar el mayor beneficio a la empresa: Industrias Varias Nacionales (INVANAL S de RL de CV). Mediante la implementación de manual de procedimientos para la optimización de los procesos de tratamientos térmicos realizados en la construcción de piezas mecánicas para la fabricación y reconstrucción de maquinaria.

1.6.1.3. Permitir el desarrollo de las destrezas y habilidades del practicante adquiridas en el proceso de estudio de la carrera de Ingeniería Metalúrgica impartida en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, de manera tal que se beneficien tanto la empresa mencionada como el practicante.

1.6.2. Objetivos específicos.

1.6.2.1. Realizar la adecuada preparación de equipos para garantizar la confiabilidad de datos experimentales de los estudios que se van a realizar posteriormente.

1.6.2.2. Recolectar y preparar adecuadamente todas las muestras de aceros del taller para su posterior análisis y estudio.

1.6.2.3. Construir una base de datos de información que consista de tablas y curvas de todas las muestras de aceros del taller para catalogarlos con la finalidad de medir la precisión de los equipos de trabajo y de optimizar los procedimientos de los diferentes tratamientos térmicos realizados dentro del taller.

1.6.2.4. Investigar las causas que producen problemas para dar la solución más adecuada a los problemas que se presentan actualmente en los procesos de tratamientos realizados en el taller.

1.6.2.5. Establecer por escrito en un manual, los procedimientos para los diferentes procesos de tratamientos térmicos realizados dentro del taller para la correcta y adecuada sistematización y ordenamiento de los mismos.

Capítulo 2: Marco Teórico.

2.1 Introducción.

El marco teórico se enfocará solo en los temas de la metalurgia que se necesitan para este proyecto de práctica, esto debido a que se debe mantener un balance adecuado en lo referente a la extensión de los temas que se van a exponer, estos temas son:

- Metalurgia experimental.
- Tratamientos térmicos del Acero.

Cada uno de estos temas, es muy profundo, por lo que el enfoque de estos temas estarán relacionados solo con el de de tratamientos térmicos de los aceros que se caracterizaran en este proyecto.

2.2. Metalurgia experimental.

Esta sección trata de los equipos más utilizados en el campo de trabajo de los tratamientos térmicos, se comienza por este tema debido a que cuando empezó el proyecto, lo primero que se examinó, fue el equipo y las herramientas que se usan en el taller de la empresa INVANAL, de hecho; para efectuar cualquier trabajo en el área de tratamientos térmicos, en cualquier empresa, se hace necesario el conocimiento de estos equipos y herramientas por lo que se decidió iniciar el marco teórico con este tema. Esta sección se divide en los siguientes temas:

- Hornos para tratamientos térmicos.
- Medición de dureza.
- Metalografías.

- **Hornos para tratamientos térmicos.**

Generalidades sobre los hornos para tratamientos térmicos.

Para realizar los diferentes tipos de tratamientos térmicos se utilizan hornos de diseño especial que permiten calentar los materiales a las temperaturas requeridas para cada tratamiento, la fuente de calor está alimentada con energía eléctrica o por combustible, el control y regulación de temperaturas se realiza mediante pirómetros y llaves que se hallan acoplados al horno. Los principales tipos de hornos son los eléctricos, los de combustión y los especiales.

Hornos eléctricos.

Están constituidos por una cámara de calentamiento alrededor de la cual se hallan instaladas varias resistencias eléctricas que suministran el calor necesario para realizar los tratamientos térmicos, existen dos clases de hornos eléctricos los cuales son, el horno de cámara o de mufla y el horno de baño con crisol.

En los hornos de cámara las piezas se colocan directamente dentro de esta, mientras que en los hornos de crisol las piezas se sumergen en baños de sales fundidas contenidas por el mismo. Generalmente, la cámara o mufla es rectangular o abovedada y está construida con material refractario altamente resistente al fuego, estos materiales pueden ser de grafito, carburo de silicio, y otros tipos de cerámico, los cuales se conocen como cerámicos de alta calidad.

En los hornos de baño, el crisol es de un acero especial para alta temperatura denominado acero refractario o de fundición de hierro y tienen generalmente una sección circular o elíptica.

Hornos de combustión.

El calor en este tipo de hornos se consigue mediante la combustión de una mezcla de aire y combustible, la cual se efectúa mediante un dispositivo especial denominado quemador, el aire se suministra a presión por un ventilador, y el combustible se inyecta por gravedad o por bombeo desde un depósito.

Los combustibles más usados son, Fuel oil, el Gas oil y el Gas natural, también son muy usados tres tipos de hornos de combustión que son, el horno de mufla, el horno de semi - mufla y los hornos verticales para baños de sales.

En los hornos de mufla la calefacción es indirecta y los productos de la combustión no entran en contacto con las piezas y su atmósfera es poco oxidante; se mejora esta condición si se coloca dentro de la mufla, junto o debajo de las piezas a tratar, bloques o sustancias carbonáceas.

En los hornos de semi - mufla, la llama no debe tocar a las piezas, pero sí los productos de la combustión, por este motivo, la atmósfera de estos hornos es oxidante, en especial a temperaturas elevadas. En los hornos verticales de crisol para baño el calor es entregado de la fuente calorífica a las piezas sumergidas en las sales fundidas, a través de éstas y del crisol, por éste motivo el rendimiento térmico de estos hornos es inferior a los de semi – mufla, pero en cambio su atmósfera se puede controlar químicamente con precisión.

Tanto los hornos de mufla y semi – mufla así como los de baño, están provistos de dos cámaras, una denominada cámara de combustión, donde se inflama la mezcla de aire y combustible, y otra que recibe el nombre de cámara de calentamiento, porque en esta son calentadas las piezas que se van a tratar.

Hornos especiales.

Para realizar algunos tratamientos térmicos, se utilizan hornos equipados con dispositivos especiales, siendo los más empleados los siguientes hornos, el horno de electrodos, el horno para tratamientos termoquímicos de gas y el horno de circulación forzada.

Hornos de electrodo.

Sirven para hacer tratamientos en baño de sales, a temperaturas medias y elevadas.

Están dotados de tres electrodos, entre los cuales se hace circular una corriente eléctrica, a través de las sales fundidas que contiene el crisol del horno, este baño desempeña la función de una resistencia eléctrica, los electrodos están sumergidos dentro del baño y se hallan conectados a un transformador.

Hornos para tratamientos termoquímicos de gas.

Sirven para efectuar algunos tratamientos termoquímicos tales como nitruración, carbonitruración, cementación con sustancias gaseosas. Están provistos de un sistema de preparación, control, inyección y circulación de los gases, generalmente la calefacción se consigue por medio de resistencias eléctricas; en ciertos hornos el calor se obtiene por medio de la combustión del gas.

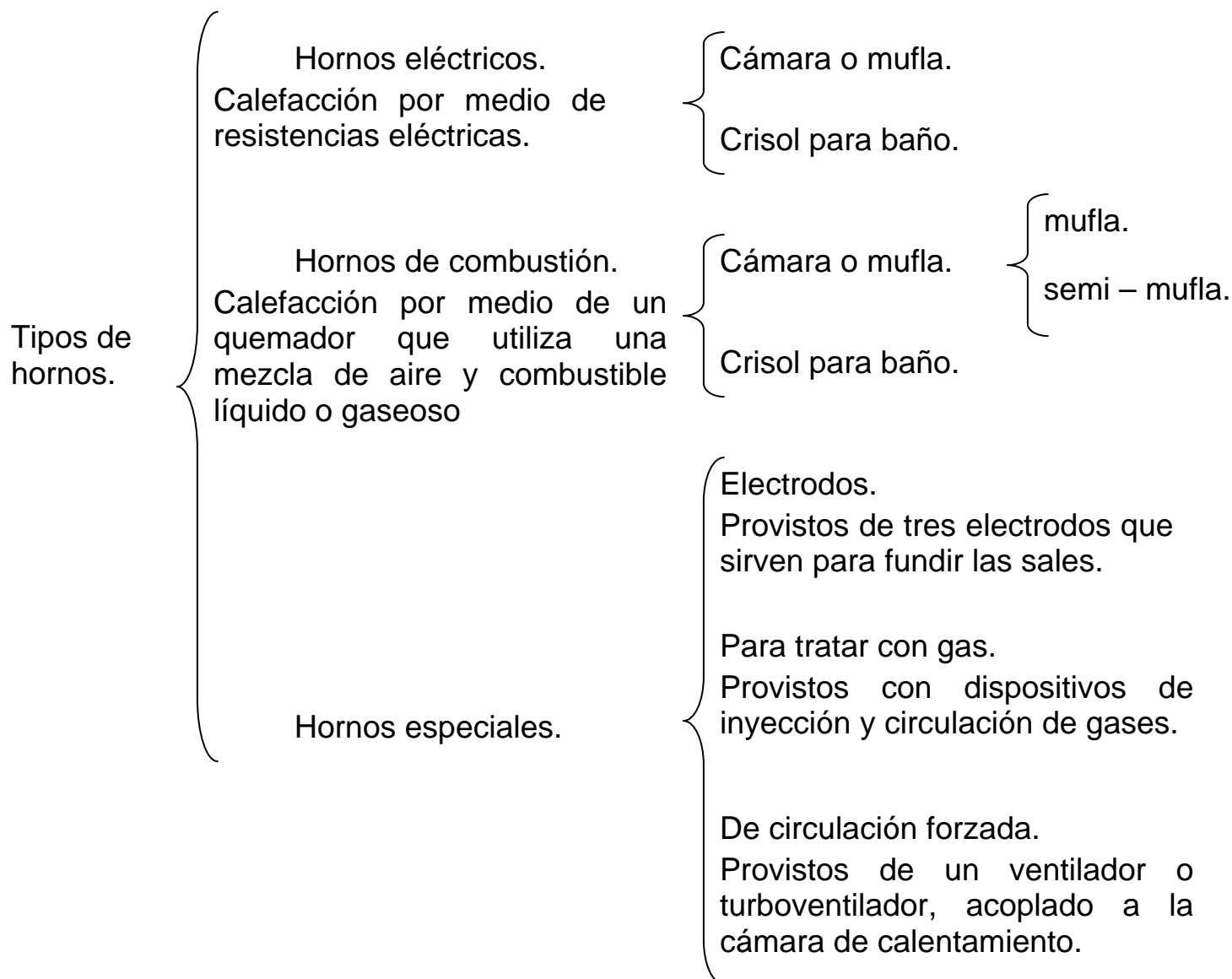
Hornos de circulación forzada.

Están equipados con un ventilador acoplado en la parte superior o inferior de la cámara de calentamiento, que sirve para hacer circular la atmósfera caliente, alrededor de las piezas que se están tratando, lográndose de este modo que la temperatura sea uniforme, en todas las zonas del horno.

El calor se proporcionará por medio de resistencias eléctricas, aunque últimamente se está empleando combustible gaseoso en algunos tipos de hornos, modificando para esto, ciertas características del mismo, a continuación se presenta un esquema que resume los tipos de hornos para tratamientos térmicos.

Los hornos para tratamientos térmicos se pueden resumir mediante el esquema 2.1:

Esquema 2.1: Hornos para tratamientos térmicos.



• Hornos eléctricos.

Estos hornos están provistos de un sistema de calefacción incorporado a la cámara, donde se colocan las piezas que van a calentarse. Son muy usados en los talleres de tratamientos térmicos, debido a la facilidad de su manejo, a la uniformidad de calentamiento, a la precisión de las temperaturas que se desean alcanzar y el mantenimiento constante de las mismas. Como se había mencionado anteriormente, los hornos eléctricos más comunes son los denominados hornos de cámara o de mufla y el horno de crisol para fundir baño de sales.

Hornos de cámara o mufla.

Se emplean principalmente para realizar las operaciones de recocido, normalizado, temple y revenido. Siendo necesario proteger las piezas contra la descarburación, usando cajas especiales.

Hornos de crisol para fundir baños de sales.

Se emplean para efectuar tratamientos donde se requiere uniformidad en el calentamiento. En este tipo de hornos, las sales fundidas protegen directamente a la pieza contra la descarburación.

Constitución de los hornos.

Los hornos eléctricos están constituidos por los siguientes elementos:

- . Carcasa.
- . Fuente de calor.
- . Cámara de calentamiento.
- . Controladores de temperatura.

En la figura 2.1 se muestra estos elementos de constitución de los hornos.

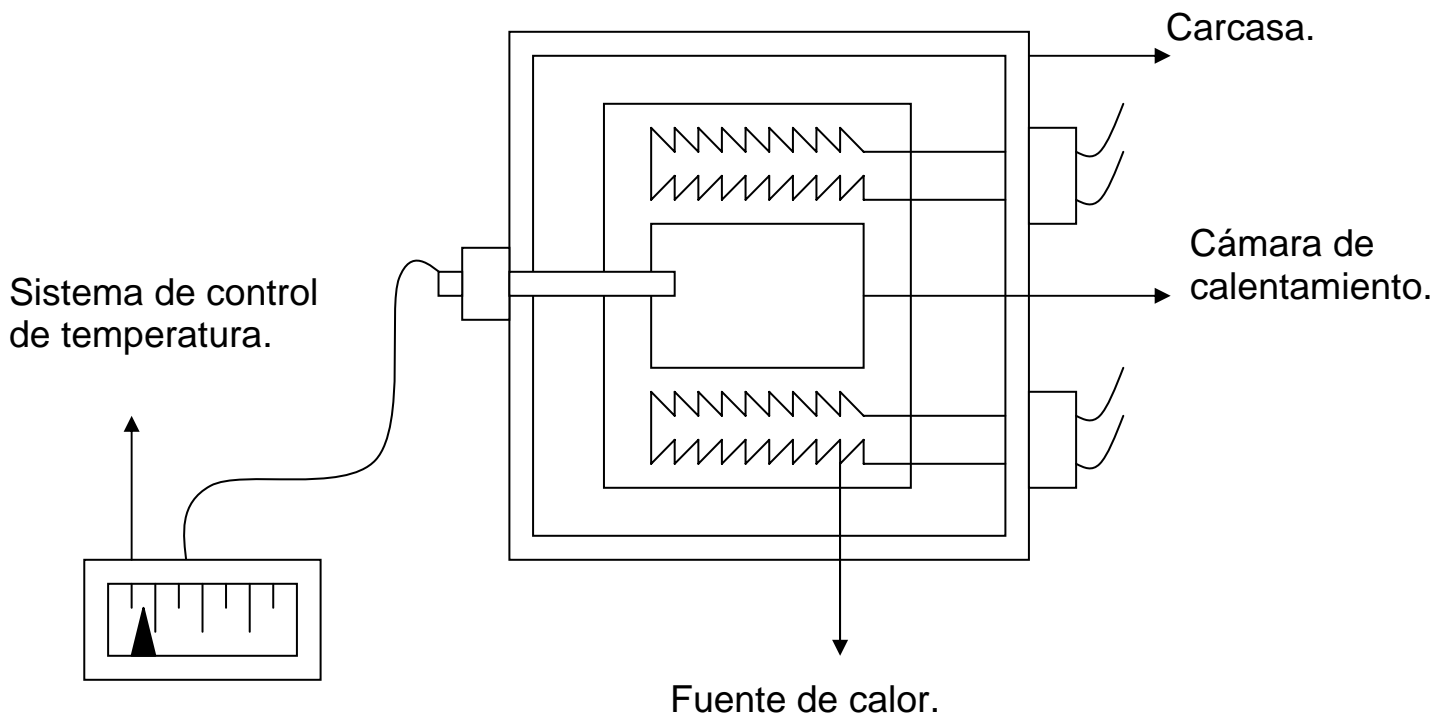


Figura 2.1: Partes constitutivas de los hornos.

Carcasa.

Es la parte exterior del horno que está construida en chapa de acero, interiormente lleva un revestimiento del material refractario que sirve para evitar pérdidas de calor en el medio ambiente.

Fuentes de calor.

En los hornos de cámara y en los de baño, la fuente de calor está constituida por una resistencia alimentada por energía eléctrica.

Las resistencias se construyen en alambre, o cinta con una aleación de cromo – níquel resistente a altas temperaturas, o de varillas refractarias a base de carburo de silicio y se hallan ubicadas en el interior de la carcasa, rodeando el crisol, o cubriendo la superficie interna de la cámara.

Cámara de calentamiento.

Es el lugar donde se colocan las piezas que van a tratarse térmicamente, a la cámara suele denominársele mufla y se fabrica de material refractario; las resistencias eléctricas están instaladas en las paredes laterales.

Las muflas, generalmente, tienen forma rectangular y frecuentemente, tienen el techo abovedado, sus dimensiones son variables, según la capacidad del horno y la finalidad para la que fue construida (figura 2.2).

En los hornos de baño ésta cámara se denomina crisol, el cual se encuentra ubicado en la zona central del horno, ésta se fabrica en acero refractario o fundición especial y en la mayoría de los casos tiene forma cilíndrica (figura 2.3).

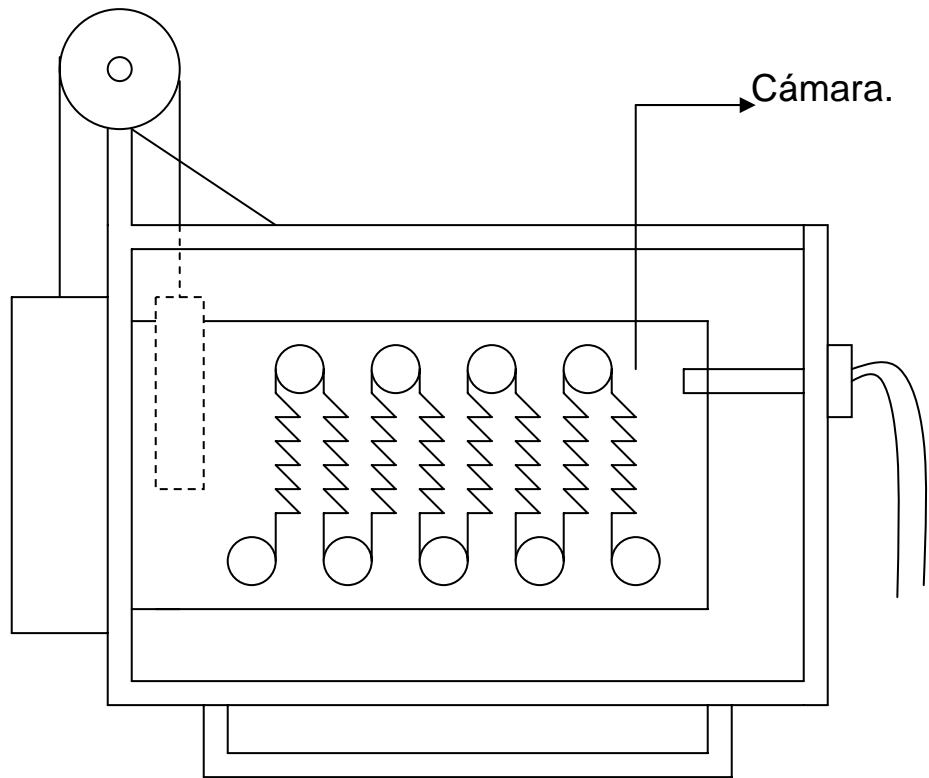


Figura 2.2: Horno de cámara o mufla.

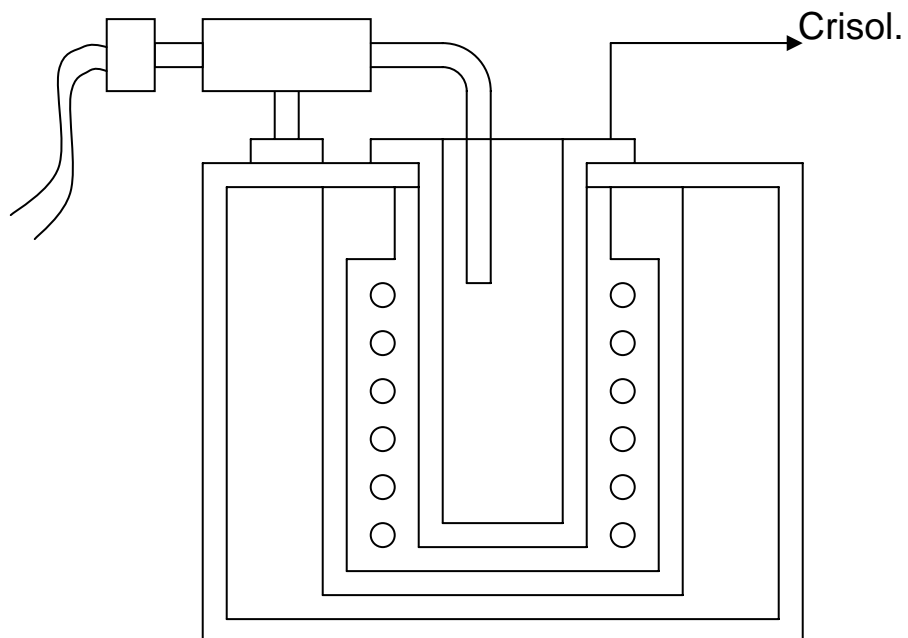


Figura 2.3: Horno de crisol.

Sistema de control de temperaturas.

Para controlar la temperatura de la cámara de calentamiento, se utiliza un pirómetro. El termopar de éste, está situado dentro de la mufla o crisol. En los hornos de cámara es fijo y se halla ubicado en la parte posterior o superior de la mufla, en un alojamiento especial; cuando el horno es de gran longitud, puede tener más de un termopar. En los hornos de baño, el termopar se coloca dentro del crisol, apoyándolo en un dispositivo de sujeción. Los pirómetros termoelectricos son aparatos que se usan para medir y controlar las temperaturas generalmente comprendidas entre 100 y 1200 °C. Se utilizan en todo tipo de hornos así como en los hornos para tratamientos térmicos, en calderas y otros dispositivos intercambiadores de calor industrial.

Constitución de los sistemas de control de temperaturas.

Los sistemas de control de temperaturas se componen de los siguientes elementos:

- . El termopar.
- . El tubo de protección o termocupla.
- . Hilos de compensación.
- . Aparato indicador o pirómetro.

La figura 2.4 presenta los elementos de un sistema de control de temperaturas.

Indicador o pirómetro.

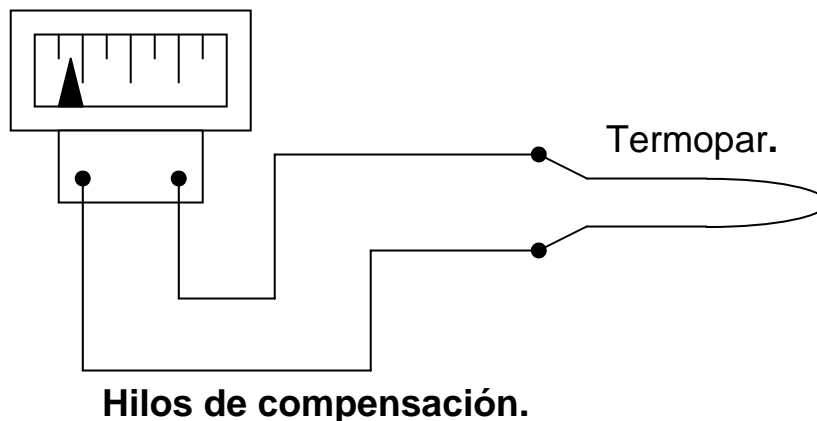


Figura 2.4: Elementos de un sistema de control de temperaturas.

El termopar.

Este elemento, está compuesto por dos alambres metálicos de composición química diferente, soldados en uno de sus extremos y unidos en el otro extremo, a los hilos de compensación como puede observarse en la figura 2.5.

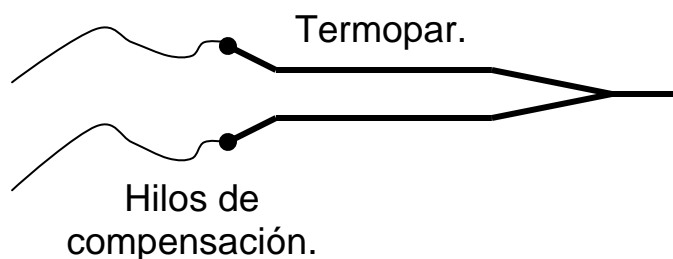


Figura 2.5: Esquema de un termopar.

Tubo de protección o termocupla.

Usualmente, se protege al termopar contra roturas y ataques de gases u otras materias destructivas, colocándolos dentro de un tubo de protección (figura 2.6) llamado tubo de protección o termocupla, el cual está construido con materiales metálicos o refractarios.

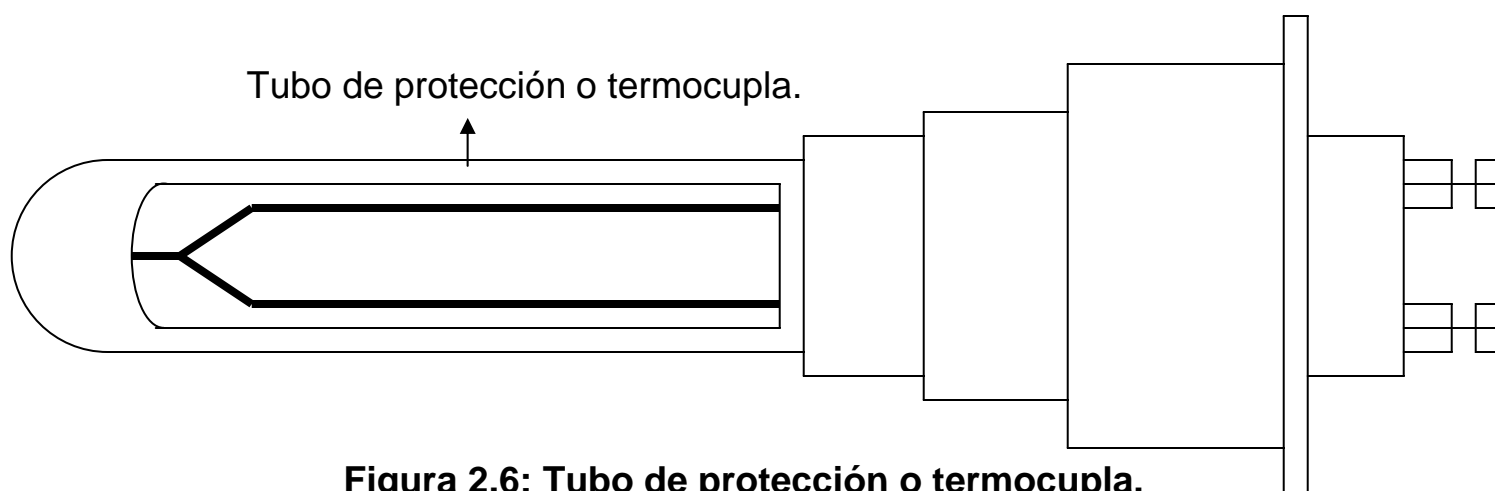


Figura 2.6: Tubo de protección o termocupla.

Hilos de compensación.

Son los alambres que sirven para conectar el termopar con el aparato indicador o pirómetro, estos están hechos de materiales especiales que evitan errores y variaciones en la medición de temperatura; en las figuras 2.4 y 2.5 se pueden apreciar cuales son los hilos compensadores.

Aparato indicador o pirómetro.

Esencialmente, están constituidos por un instrumento eléctrico de medición que sirve para registrar la temperatura. Las lecturas se hacen observando una aguja indicadora móvil que se desplaza sobre una escala graduada. Los tipos de pirómetros que podemos encontrar son:

- . Pirómetro termoelectrico simple.
- . Pirómetro termoelectrico automatico.

La diferencia entre estos tipos de pirómetros es el aparato medidor, esto se puede observar con más claridad en las figuras 2.7 y 2.8.

. Pirómetro termoelectrico simple.

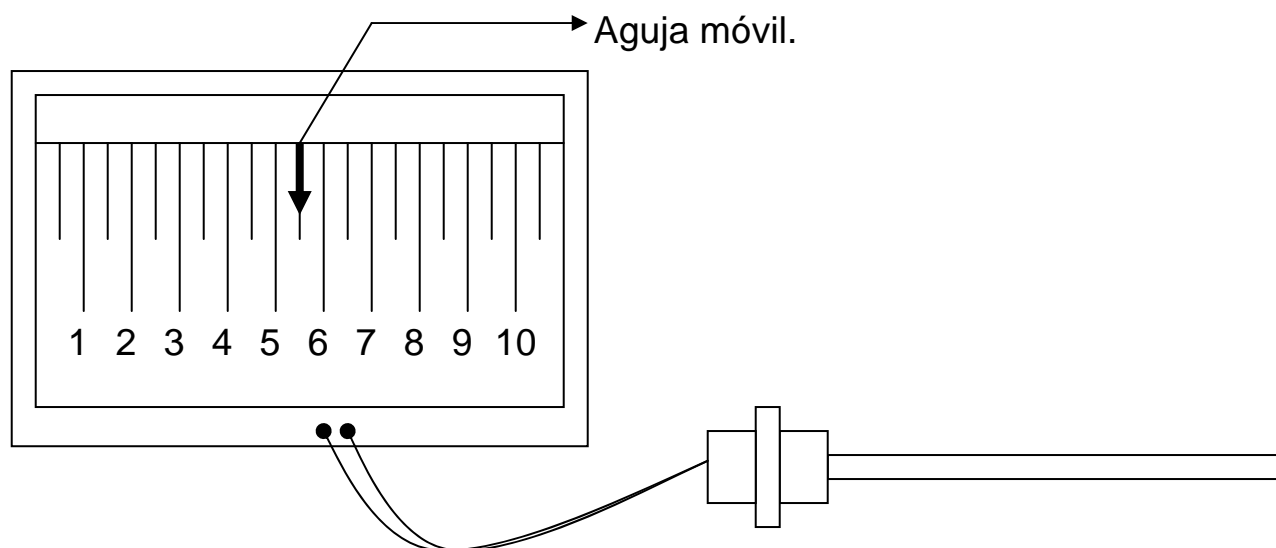


Figura 2.7: Pirómetro termoelectrico simple.

Nota: tiene un indicador que únicamente registra las temperaturas.

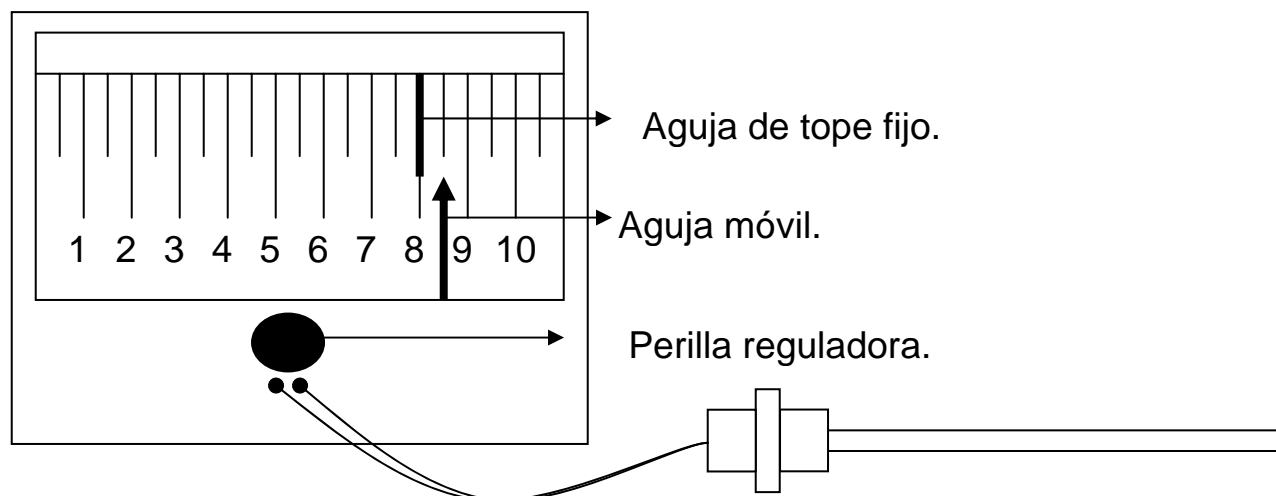


Figura 2.8: Pirómetro termoelectrico automatico.

Notas:

1. Estos pirómetros tienen incorporados un regulador de temperatura al aparato indicador. Este aparato tiene dos agujas móviles, una de ellas señala la temperatura y la otra sirve como limitador de la misma.
2. El control de temperatura es automático y la selección de valores en la escala graduada, se hace accionando la perilla de regulación que desplaza a la aguja limitadora, este tipo de indicador también se denomina regulador automático de temperatura.

Principio de funcionamiento.

Cuando los extremos soldados del termopar se calientan al ponerse en contacto con una fuente de calor, se crea una corriente eléctrica entre los dos alambres soldados. Esta corriente eléctrica se transmite por medio del hilo de compensación hasta el aparato indicador, donde se acciona la aguja móvil la cual se desplaza sobre una escala de temperaturas.

El desplazamiento de la aguja sobre la escala de temperaturas es mayor, cuando mayor es la temperatura de la fuente calorífica medida, la corriente eléctrica generada, es directamente proporcional a la temperatura del termopar.

Condiciones de uso.

Los pirómetros se deben montar en un lugar que no pueda ser afectado ni por vibraciones, ni por el calor del horno o de piezas calientes. Además se debe comprobar que los terminales de los hilos de compensación, estén firmemente conectados a los bornes del indicador de temperatura.

Observación:

Existen pirómetros termoelectricos automáticos con registrador gráfico. Los más utilizados en los talleres de tratamientos térmicos son los automáticos, debido a que con los mismos se obtienen un control y regulación permanente de la temperatura.

- **Medición de durezas.**

Generalidades sobre las mediciones de dureza.

La dureza en sí es uno de los tantos ensayos mecánicos que se les puede hacer a los materiales, entre los principales ensayos de este tipo, se encuentran los siguientes:

- . Ensayo de tracción.
- . Ensayo de compresión.
- . Ensayo de flexión.
- . Ensayo de torsión.
- . Ensayo de impacto.
- . Ensayo de fatiga.
- . Ensayo de dureza.

Para este proyecto, solo nos concentraremos en las mediciones de dureza, debido a que la principal finalidad de los tratamientos térmicos, es producir las propiedades deseadas ya sea endurecer o ablandar los materiales para darles resistencia al desgaste o maquinabilidad según sea el caso, comenzaremos contestando entonces, la siguiente pregunta; que es la dureza?

La dureza es la resistencia que presenta un material a ser indentado o rayado por otro material más duro, en el caso de los metales, las mediciones de dureza que más se usan, son tres escalas, las cuales son:

La escala Rockwell.

La escala Brinell.

La escala Vickers.

Hay otras escalas de dureza para medición de materiales en general tales como las escalas de Shore, Knoop y Mohs, pero para tratamiento térmico de metales las escalas más usadas son la Rockwell, Brinell y Vickers, a continuación se estudian cada una de ellas.

Escala de dureza Rockwell.

Este ensayo consiste en indentar con un cono de diamante o una esfera de acero el material que se va ensayar. La lectura de la dureza se hace en forma rápida y directa, en un reloj especial que traslada la medida en cifras unitarias de dureza Rockwell.

Características del ensayo Rockwell.

Las principales características de este ensayo son:

- . Lectura directa de la dureza.
- . Aplicación simultánea de dos cargas.
- . Medida de la dureza por la longitud de indentación.

Lectura directa de dureza.

La lectura de los valores de la dureza se realiza, en las escalas del reloj que está incorporado y acoplado al dispositivo de aplicación de las cargas de la máquina de ensayo.

Aplicación simultáneas de dos cargas.

En los ensayos Rockwell se aplican dos cargas diferentes: una inicial de 10 Kg y después una carga final mayor que la anterior, la cual varía de acuerdo al tipo de ensayo que se va a realizar.

Medida por la longitud de indentación.

La distancia indentada por el diamante o esfera es directamente proporcional a la carga, e inversamente proporcional a la dureza del material, esta proporción no es lineal.

Tipos de ensayo Rockwell.

Los tipos de ensayo Rockwell son los siguientes:

- . Ensayo Rockwell B.
- . Ensayo Rockwell C.

Ensayo Rockwell B.

En este ensayo se utiliza como indentador una esfera de acero templado, con un diámetro de 1,578 mm y una carga final de 90 Kg como se puede ver en la figura 2.9.

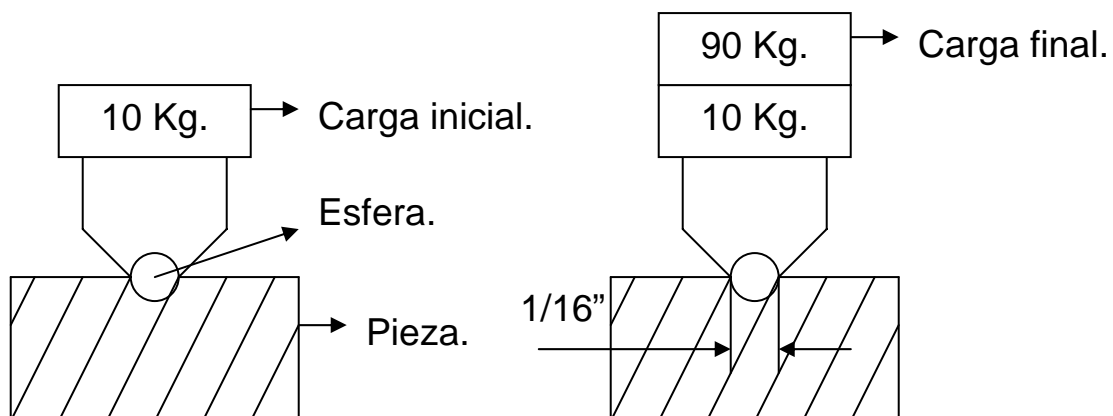


Figura 2.9: Ensayo Rockwell B (HRB).

Ensayo Rockwell C.

El indentador utilizado para este ensayo se denomina Brale, es un cono de diamante con un ángulo de 120° y con la punta esférica con un radio de 0,2 mm. La carga final empleada para realizar este ensayo es de 140 Kilogramos (ver figura 2.10).

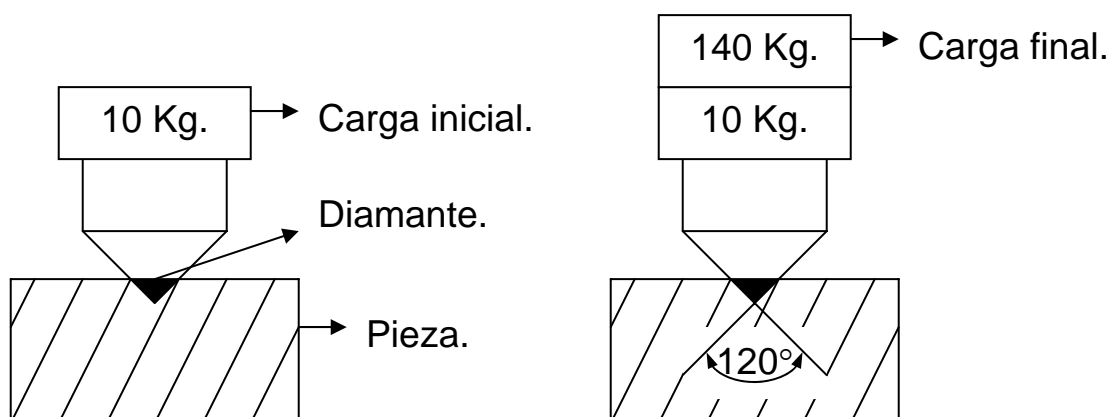


Figura 2.10: Ensayo Rockwell C

Con respecto a los usos podemos decir que el indentador de bola de 1/16 de pulgada, es empleado para materiales cuya dureza oscile entre 0 y 100 de la escala Rockwell B. La lectura se hace en la escala roja del reloj, también denominada escala RB (ver figura 2.11).

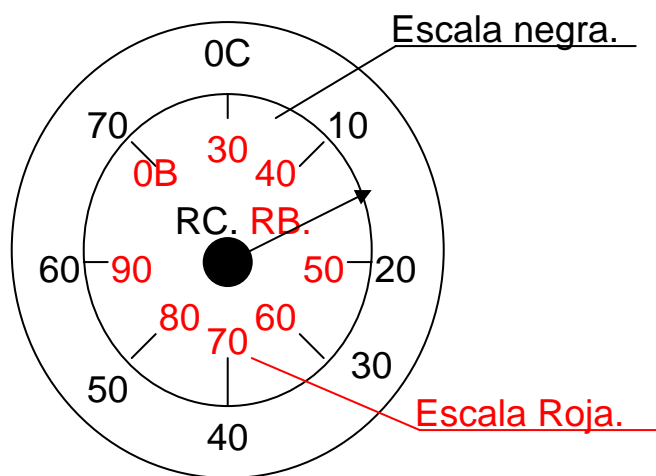


Figura 2.11: Escalas de ensayo Rockwell.

El indentador Brale se utiliza para materiales cuya dureza oscile entre 20 y 70 de la escala Rockwell C. La lectura en este caso se efectúa en la escala negra del reloj o escala C.

Observación:

Para determinar la dureza de la superficie de aceros nitrurados o cementados o de piezas delgadas tales como hojas de afeitar, se emplea un ensayo especial denominado "Rockwell superficial", el cual se realiza usando un indentador denominado "Brale N", éste es igual al descrito anteriormente, pero sujeto a tolerancias de fabricación más estrechas, se utiliza para metales duros con carga inicial de 3 Kg, y adicionales de 12, 27 y 42 Kg.

Para metales blandos se utiliza el indentador de bola de 1/16 de pulgada, con las mismas cargas mencionadas, la máquina es más sensible que la normal y también regula la velocidad de recorrido del indentador por medio de un freno hidráulico.

Condiciones para el ensayo Rockwell C.

Las condiciones para el ensayo son:

- a. Antes de determinar la dureza de un material se debe realizar por lo menos una medición previa, por cuanto la primera lectura puede ser errónea.
- b. El indentador debe quedar perpendicular a la pieza y esta no debe moverse durante el ensayo.
- c. Las piezas deben presentar una superficie plana, lisa y libre de suciedad, cascarilla o partículas duras que puedan falsear los resultados del ensayo.
- d. La superficie de la pieza no debe calentarse durante su preparación para evitar el ablandamiento de la misma, por el efecto de revenido y para no crear tensiones internas en el material.

- e. En piezas redondas menores de diez milímetros de diámetro, la curvatura falsea el resultado, se debe entonces rectificar con piedra esmeril o lima, una pequeña zona para la huella de impresión, de lo contrario; se debe acompañar el valor del diámetro de la pieza al de la dureza obtenida.
- f. El espesor debe ser suficientemente grueso con respecto a la carga y al indentador para evitar el “efecto yunque”, este puede detectarse observando la cara opuesta, para ver si aparecen señales de compresión o de la impresión del indentador. En general, se establece un espesor de la pieza mayor o igual a diez veces la indentación del diamante.

Escala de dureza Brinell.

Consiste en comprimir contra la superficie de la pieza metálica a probar, una esfera de acero muy dura, aplicando una carga estática durante un cierto tiempo (ver figura 2.12), para medir luego las dimensiones de la huella impresa.

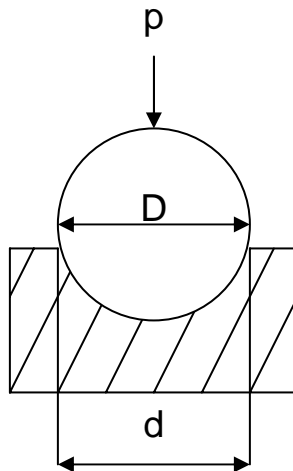


Figura 2.12: Ensayo Brinell (HB).

La impresión dejada por la bola en el metal de la pieza, en términos geométricos, es un casco esférico; el valor numérico de la dureza Brinell, se obtiene dividiendo la carga aplicada por el área de la superficie de éste casco esférico, el cual puede calcularse fácilmente partiendo de su diámetro, a través de una serie de deducciones matemáticas, obteniéndose así una fórmula que utiliza como datos

numéricos, el diámetro de la bola, el diámetro de la huella impresa y la constante π .

El área de la huella impresa es:

$$S_d = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{2} - \frac{\pi \cdot D}{2} \right) \cdot \sqrt{D^2 - d^2}$$

Siendo:

D = Diámetro de la esfera en mm.

d = Diámetro de la huella impresa.

$\pi = 3,1416$

De acuerdo a lo dicho anteriormente se debe dividir la carga por el valor de esta superficie, quedando:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Siendo

P = La carga aplicada en Kg.

La carga se expresa en kilogramos y la superficie en milímetros cuadrados. En la práctica, y para mayor comodidad, se utilizan tablas que indican la dureza correspondiente a cada uno de los diferentes diámetros de las huellas impresas, las cuales se miden con lupa graduada o con micrómetro óptico. Estas tablas pueden ser consultadas en el manual suministrado por el fabricante del equipo.

Identadores.

En el ensayo Brinell normal, se emplean como identadores las bolas esféricas de 5 mm o 10 mm de diámetro, para estos casos especiales pueden utilizarse otras bolas tales como 1,25 mm; 2,50 mm y 7 mm, los ensayos realizados con tales bolas, no pueden considerarse ensayos normalizados.

Las bolas pueden ser construidas de acero al carbono, acero aleado y carburo de tungsteno, el empleo de las bolas depende del material a ensayar.

Cargas.

Las cargas para los ensayos Brinell están en función del diámetro de la esfera y del material ensayado, como se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Cargas y materiales de aplicación del ensayo Brinell.

Diámetro de esferas. (mm)	Cargas (Kg) y materiales de aplicación.			
	Aceros y hierro fundido.	Bronce y latón duro.	Cobre y aluminio.	Metales blandos.
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,50
2,5	187,50	62,50	31,25	15,625

Observaciones:

Cuando se utiliza una esfera de 10 mm y una carga de 3000 kg, se puede teóricamente determinar la dureza Brinell, aplicando la fórmula anterior en una escala comprendida entre 65,5 y 645 unidades; sin embargo, como las esferas de acero, sufren deformaciones cuando la dureza del material excede a 525 unidades Brinell, se deben utilizar entonces, esferas de carburo de tungsteno que son más duras y por lo tanto sufren menos deformaciones.

En general para obtener una mayor exactitud, se recomienda no exceder mediciones de dureza, mayores a 600 unidades Brinell.

Usos del ensayo Brinell.

Este ensayo se usa generalmente para determinar durezas de aceros recocidos laminados o normalizados y especialmente para metales no muy duros, tales como el cobre y sus aleaciones, así como del aluminio y sus aleaciones.

Condiciones para el ensayo.

- a. Para obtener los valores exactos en la determinación de las durezas, los ensayos Brinell deben reunir las siguientes condiciones:
- b. El ensayo debe ser hecho sobre una superficie plana, limpia, lisa y sin porosidades.
- c. El indentador debe estar perpendicular a la superficie de la pieza y esta no debe moverse durante el ensayo.
- d. La distancia del borde de la pieza, al punto donde se va a hacer la impresión, debe ser aproximadamente 3 veces el diámetro de la huella y debe estar a 4 veces del centro a otra impresión.
- e. El espesor de la pieza, debe ser mayor al doble del diámetro de la impresión, para evitar el “efecto del yunque”, después del ensayo, la cara opuesta no debe presentar marcas.
- f. La superficie de la pieza a probar no debe calentarse durante su separación, para no dar lugar al desarrollo de tensiones internas en el material.

Ensayo Vickers.

El ensayo Vickers consiste en determinar la dureza de un material, utilizando un penetrador especial, para medir después la diagonal de la huella que este deja, sobre la superficie de la pieza.

Indentador de cargas.

El indentador de cargas Vickers, es un pequeño diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular cuyas caras opuestas tienen un ángulo de 136° (ver figura 2.13).

Este ángulo fue elegido para que los números de dureza Vickers coincidan con los de Brinell, aunque esta semejanza solo se cumple hasta aproximadamente 350 unidades Brinell, debido a la deformación que sufre la bola durante el ensayo al sobre pasar esta cifra.

Las cargas más recomendadas para realizar el ensayo Vickers son las de 1 – 2,5 – 5 – 10 – 20 – 30 – 50 – 100 y 120 Kg. de las cuales la más utilizada es la de 30 Kg.

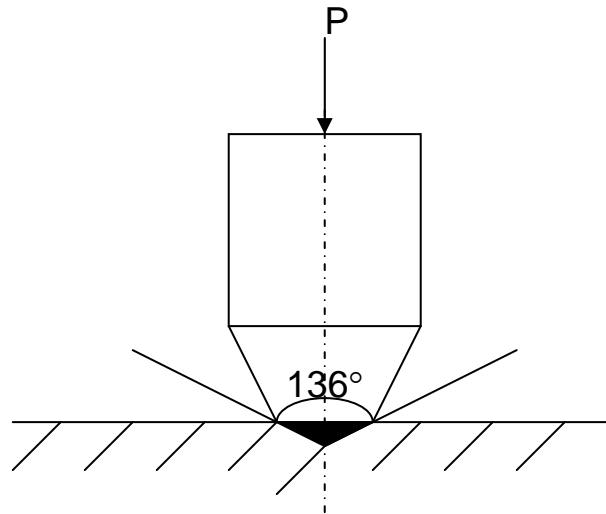


Figura 2.13: Ensayo Vickers (HV).

Determinación de la dureza.

Después de haberse aplicado la carga sobre el material, en este aparece una pequeña huella impresa (ver figura 2.14) para determinar la dureza, se miden las diagonales de la huella con un microscopio o un micrómetro óptico.

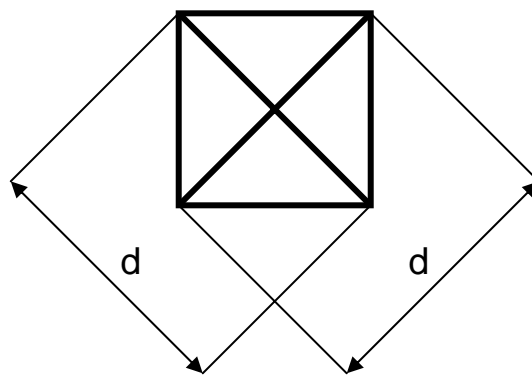


Figura 2.14: Huella impresa del ensayo Vickers.

El valor numérico se obtiene, como en el ensayo Brinell, al dividir la carga por la superficie de la huella, pero es más práctico utilizar las tablas siendo la más usual la correspondiente a la carga de 30 Kg;

estas se pueden consultar en el manual que suministra el fabricante, una fórmula para calcular la dureza Vickers es la siguiente:

$$HV = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}$$

Siendo

P = La carga aplicada en Kg.

d = La diagonal de la huella impresa.

Usos del ensayo Vickers.

El ensayo Vickers se utiliza cuando se requiere precisión en la determinación de las durezas, debido a su versatilidad, se emplea para ensayar materiales blandos, metales templados y metales tratados termoquímicamente. Además como la huella impresa es muy pequeña permite ensayar láminas de poco espesor y piezas terminadas sin perjudicar las superficies de las mismas.

Condiciones para el ensayo.

Las piezas que se van a ensayar deben presentar una superficie pulida, plana y perpendicular al eje de simetría del indentador. La carga total se aplica lentamente en especial su última fracción para evitar los efectos de inercia y descarga brusca. La impresión debe realizarse en una zona plana de la pieza y el espesor mínimo de esta debe ser aproximadamente 1,5 veces el tamaño de la diagonal de la huella, para evitar el “efecto yunque”, en la figura 2.15 se puede observar los espesores mínimos que deben tener las piezas a ensayar, en relación a la carga utilizada y a la dureza del material ensayado. Así por ejemplo, para un ensayo de dureza Vickers con 30 Kg para una dureza comprendida entre 200 y 300 unidades Vickers, la pieza deberá tener un espesor igual o mayor a 0,75 mm. El tiempo que permanece aplicada la carga total varía usualmente de 10 a 30 segundos.

Esta permanencia de la carga tiene por objeto permitir que se completen las deformaciones plásticas del material, en la pequeña zona de ensayo.

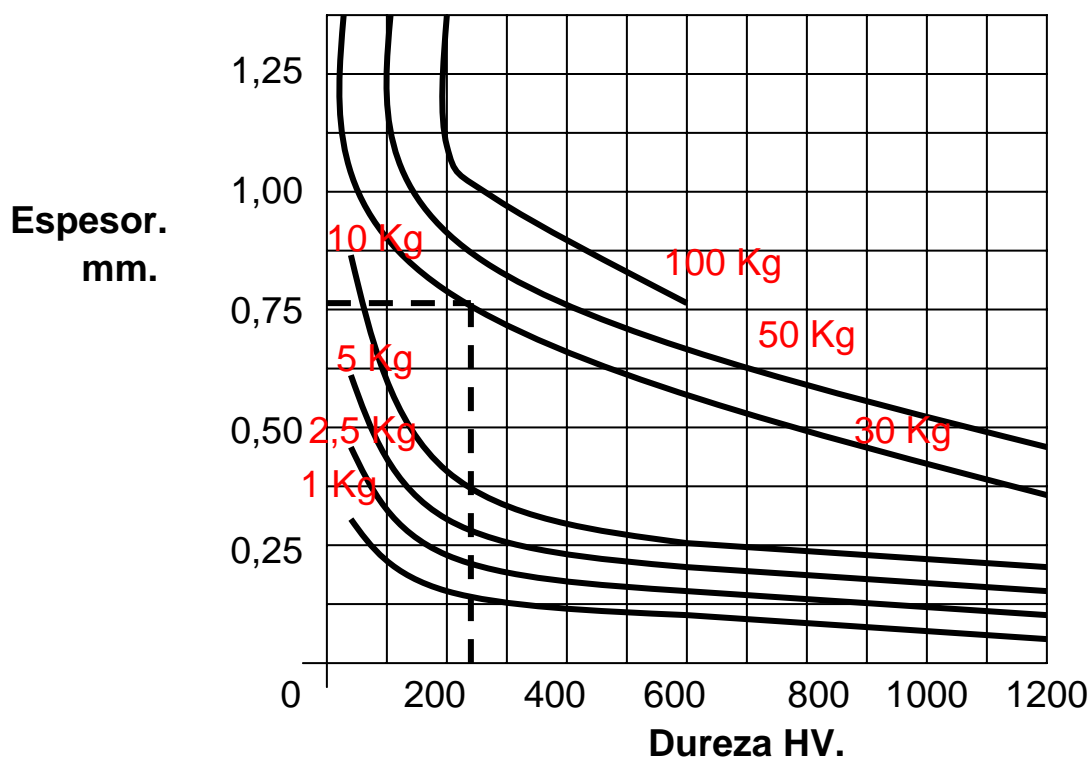


Figura 2.15: Relación entre espesores mínimos – dureza y carga aplicada.

Tablas de equivalencias de dureza entre escalas.

Entre las tres escalas de dureza, Rockwell, Brinell y vickers existen equivalencias, a continuación se muestra la tabla 2.2 que muestra las conversiones de dichas escalas y con los valores más útiles para los procesos de tratamientos térmicos.

Tabla 2.2: Tabla de conversión de durezas aproximadas.

Brinell.		Vickers.		Rockwell.	
Diámetro (mm).				C.	B
Carga 3000 Kg.	Dureza.	Dureza.		Carga 150 Kg.	Carga 100 Kg
Bola 10 mm.	Nº	Nº		Cono de 120°	Bola 1/16"
2,05	898	—		—	—
2,10	857	—		—	—
2,15	817	—		—	—
2,20	780	1 150		70	—
2,25	745	1 050		68	—
2,30	712	960		66	—
2,35	682	885		64	—

**Tabla 2.2: Tabla de conversión de durezas aproximadas
(continuación).**

Brinell.		Vickers.	Rockwell.	
Diámetro (mm).			C.	B
Carga 3000 Kg.	Dureza.	Dureza.	Carga 150 Kg.	Carga 100 Kg
Bola 10 mm.	N°	N°	Cono de 120°	Bola 1/16"
2,40	653	820	62	—
2,45	627	765	60	—
2,50	601	717	58	—
2,55	578	675	57	—
2,60	555	633	55	120
2,65	534	598	53	119
2,70	514	567	52	119
2,75	495	540	50	117
2,80	477	515	49	117
2,85	461	494	47	116
2,90	444	472	46	115
2,95	429	454	45	115
3,00	415	437	44	114
3,05	401	420	42	113
3,10	388	404	41	112
3,15	375	389	40	112
3,20	363	375	38	110
3,25	352	363	37	110
3,30	341	350	36	109
3,35	331	339	35	109
3,40	321	327	34	108
3,45	311	316	33	108
3,50	302	305	32	107
3,55	293	296	31	106
3,60	285	287	30	105
3,65	277	279	29	104
3,70	269	270	28	104
3,75	262	263	26	103
3,80	255	256	25	102
3,85	248	248	24	102
3,90	241	241	23	100
3,95	235	235	22	99
4,00	229	229	21	98
4,05	223	223	20	97

Constitución y tipos de máquinas para medir dureza.

Los ensayos de dureza Rockwell, Brinell y Vickers, se realizan utilizando máquinas de diversos tipos, que permiten que una carga aplicada sobre un indentador actúe sobre el material a ensayar.

Constitución de las máquinas de ensayo de dureza.

Las máquinas de ensayo de dureza están constituidas básicamente de:

- . Cargas y su mecanismo de aplicación.
- . Soporte y elevador de piezas.
- . Dispositivos de indentación.
- . Aparato de medición y lectura.

Estas partes se pueden apreciar en la figura 2.16 a la 2.20.

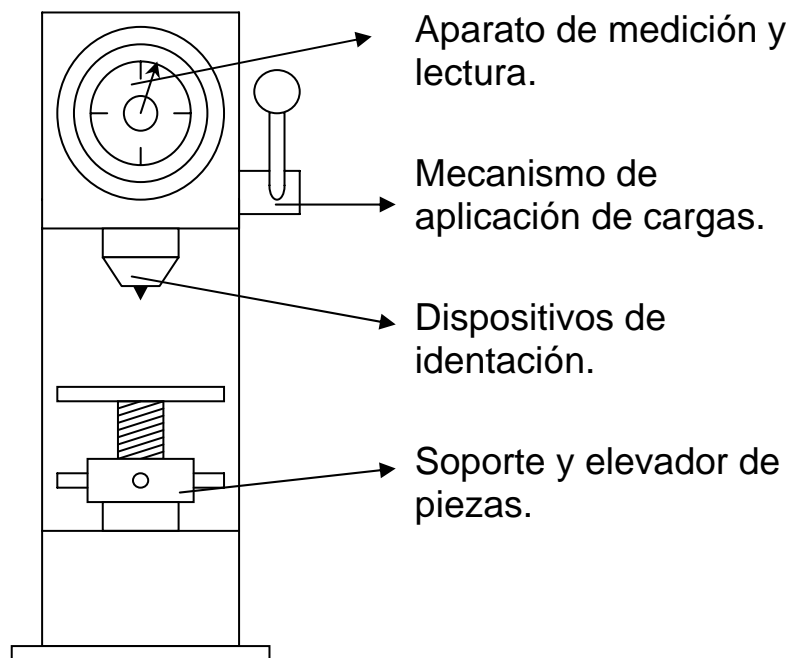


Figura 2.16: Partes constituyentes del medidor de durezas.

Mecanismo de aplicación de cargas.

Está constituido por dispositivos especiales que sirven para seleccionar las cargas y aplicarlas sobre el indentador. Según el tipo de máquina, las cargas pueden actuar accionando un sistema mecánico o hidráulico.

En el primer caso las diferentes pesas están colocadas en un extremo del mecanismo y la selección se hace manualmente o mediante un selector, en el segundo caso, se seleccionan las cargas y se controlan mediante un manómetro, un amortiguador hidráulico puede regular la velocidad de aplicación de la carga.

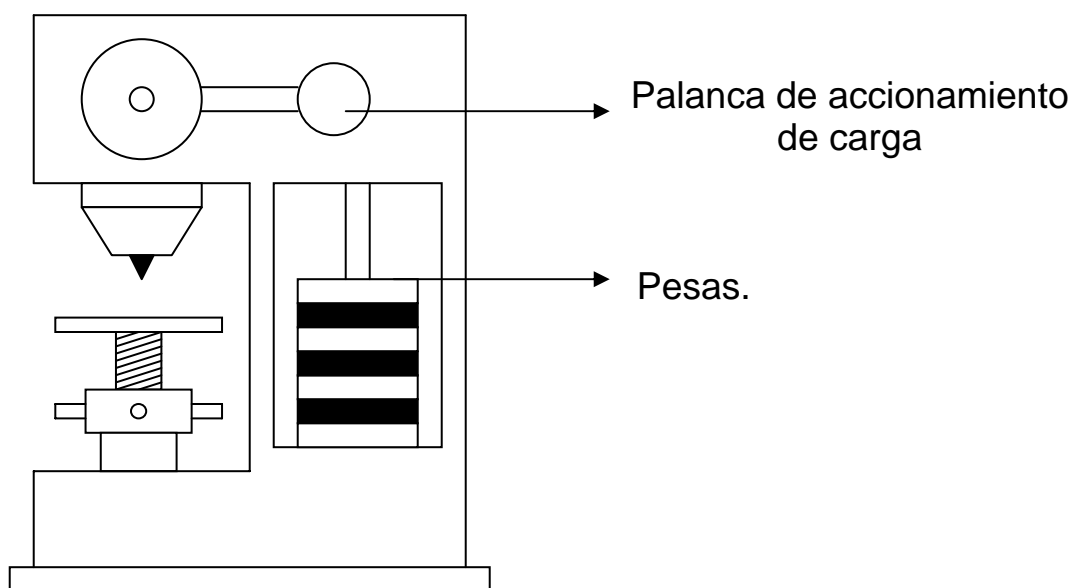


Figura 2.17: Mecanismo de aplicación de cargas.

Soporte y elevador de piezas.

Es la parte de la máquina donde se colocan las piezas a ensayar, generalmente, consta de tres partes, soporte, volante y elevador. El soporte (plato) situado en la parte superior del conjunto, es intercambiable y tienen diferentes formas y tamaños de acuerdo al tipo de piezas a ensayar. El elevador es un tornillo, que permite subir o bajar mediante el giro de un volante, el cual se encuentra en la parte inferior del elevador.

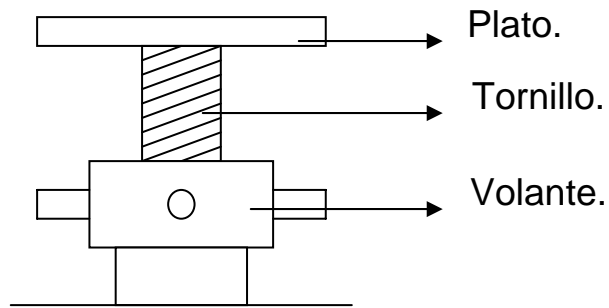


Figura 2.18: Soporte y elevador de cargas.

Dispositivos de indentación.

Está compuesto por un cabezal y el indentador, este puede ser un diamante o una esfera, según el tipo de ensayo. El indentador se sujeta al cabezal por medio de un tornillo o un cono roscado. Algunas máquinas poseen un protector para el indentador.

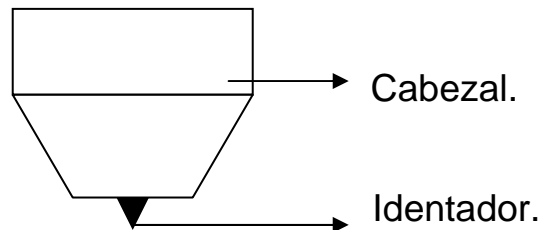


Figura 2.19: Dispositivos de indentación.

Aparatos de medición y lectura.

Existen dos clases de aparatos de medición y de lectura de dureza: los ópticos y los de lectura directa. Los ópticos se utilizan para los ensayos Brinell y Vickers, y los de lectura directa para el ensayo Rockwell.

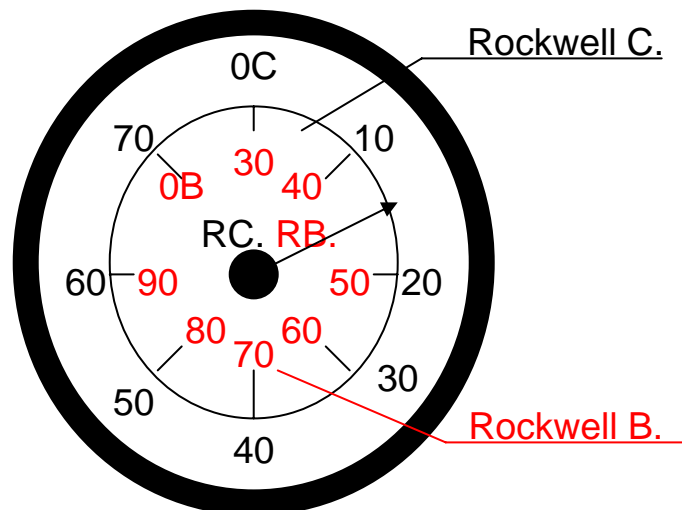


Figura 2.20: Aparato de medición y de lectura.

- **Metalografías.**

Generalidades sobre el análisis metalográfico.

El análisis metalográfico, es una de las técnicas más útiles y usadas en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales, específicamente en la rama de la metalurgia, ya que es en esta rama, donde más se usa ésta poderosa herramienta la cual nos permite estudiar la microestructura de las aleaciones. Para este tipo de análisis se realiza en una serie de pasos, con una serie de equipos, que expondremos paulatinamente de modo que el tema sea expuesto adecuadamente. Comenzamos exponiendo los diferentes pasos para realizar un examen metalográfico.

Pasos para una metalografía.

Los pasos en que se realiza esta técnica son los siguientes:

- . Corte de la muestra.
- . Desbaste grueso.
- . Montaje en resina plástica.
- . Desbaste fino.
- . Pulido.
- . Ataque químico.
- . Micrografía.
- . Análisis.

Corte de la muestra.

Esta etapa consiste en cortar una muestra a un tamaño de manera tal que pueda ser montado en una resina plástica, éste montaje se realiza en un equipo especial que expondremos más adelante. Los equipos de corte pueden ser cualquier tipo de sierra de corte para metales, esta puede ser manual o automática, también hay equipos de corte especial para este tipo de trabajos tal como se muestra en la figura 2.21:



Figura 2.21: Cortadora de muestras.

Este tipo de equipo está diseñado especialmente para este tipo de trabajos por lo que es recomendable realizar los cortes en este equipo, la cortadora consta de un sistema de enfriamiento que evita las tensiones térmicas que se producen al cortar una muestra, el equipo también cuenta con un disco especial carburado que facilita el corte de las muestras de piezas endurecidas ya sea por el proceso de temple o por el proceso de carburización, las piezas después de carburarse son difíciles de cortar debido a la dureza que alcanzan las piezas después del proceso, por lo que este tipo de equipos es ideal para el corte de este tipo de piezas.

Desbaste grueso.

Esta etapa consiste en desbastar el material de manera tal que la pieza quede lo más plana y recta posible, esto para evitar que se formen planos en la pieza que distorsionen la visión en el microscopio más adelante. Éste proceso se puede realizar mediante un esmeril, una máquina rectificadora ó rectificadada en un torno, también hay equipo especial para este trabajo tal como se muestra en la figura 2.22:



Figura 2.22: Máquina para desbaste grueso.

Este tipo de equipos es el más apto para este tipo de trabajos, debido a que tienen dispositivos de sujeción que permite que la pieza al ser desbastada quede con una superficie recta de forma tal que no se distorsione la luz del microscopio óptico y se pueda ver la micro estructura del metal con una mejor calidad de imagen.

Montaje en resina.

En esta etapa, la muestra se pone dentro de una cápsula de resina plástica con la finalidad de que sea de fácil manipulación para las operaciones posteriores, el equipo que se usa para esta operación, es una prensa; la cual se muestra en la figura 2.23:



Figura 2.23: Prensa para montaje de muestras.

Esta prensa tiene una cámara metálica (ver figura 2.24) donde se deposita una resina plástica, esta puede ser Bakelita u otra resina que pueda ser conformada a alta temperatura combinada con una alta presión, una vez que la resina está en la cámara, se calienta la misma con resistencia eléctrica, simultáneamente; se le imprime presión alrededor de 7 Kilo Pascales, esta presión pueden ser mayor o menor dependiendo del tipo de resina que se use y del tipo de configuración geométrica de la cámara.

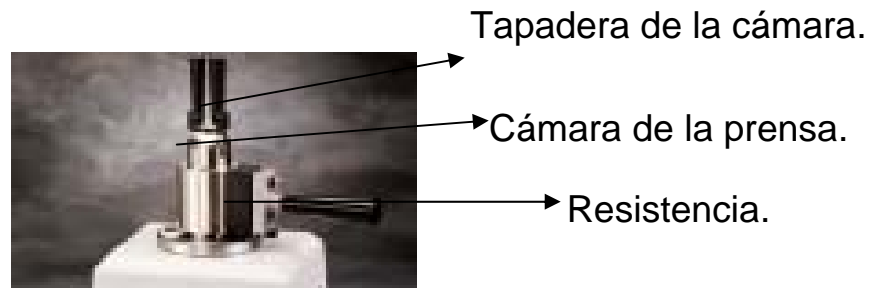


Figura 2.24: Cámara cilíndrica de la prensa.

Cuando la resina se funde en la cámara, la presión en la misma se reduce; por lo que se debe estar elevando la presión en la cámara constantemente hasta que se mantenga fija, una vez que se fije la presión, se debe calentar la cámara alrededor de quince minutos, el tiempo de calentamiento dependerá también del tipo de resina y del volumen de la cámara, este tiempo puede consultarse en el manual del equipo, una vez cumplido el tiempo de calentamiento; se deja enfriar al aire la resina, para ayudar un poco a aumentar la velocidad de enfriamiento se deben poner alrededor de la cámara unos disipadores de calor de aluminio con aletas, tal como se muestra en la figura 2.25:

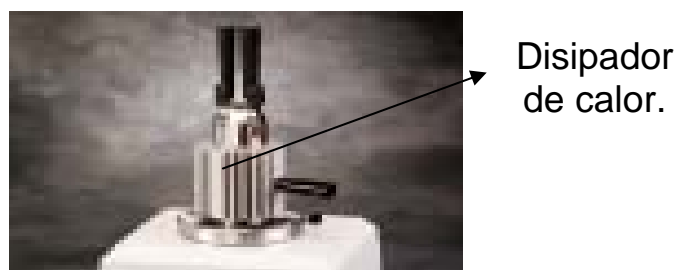


Figura 2.25: Disipador de calor de aluminio.

El enfriamiento con los disipadores debe ser siempre al aire calmo, una vez fría la cámara se debe extraer la muestra, el producto de esta operación es una muestra en resina plástica tal como se muestra en la figura 2.26:

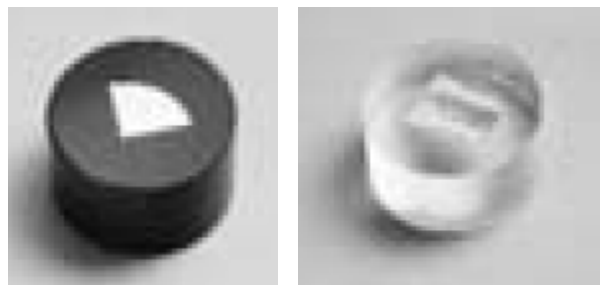


Figura 2.26: Muestras o probetas en resina.

Desbaste fino.

Esta etapa consiste en hacer pasar la superficie que se quiere analizar de la muestra, sobre varios papeles de lija los cuales van alisando gradualmente la superficie de manera tal que se va dando un pulimento intermedio al metal, para que la superficie de la muestra se prepare adecuadamente previo a la etapa del pulido, esta operación se realiza en el equipo que se muestra en la figura 2.27:



Figura 2.27: Rejillas para desbaste fino.

Los papeles lija más usados son el papel para lijar en agua número 250, 320, 450 y 600, se pueden usar papeles con grano más fino como lo es el papel número 1000 si se requiriera. El tamaño de grano de la lija es inversamente proporcional al número del papel, es decir, a

mayor número de papel, más fino será el tamaño de grano de la lija; la secuencia de la operación de lijado se realiza del menor número al mayor número de papel o si se quiere, se puede decir también; que se lija desde el mayor grano de lija al menor grano. Cada vez que se pasa por un diferente número de papel, se debe girar la muestra 90° con respecto al ángulo usado en el papel anterior, esto se ilustra mejor en las figuras 2.28 y 2.29:



Figura 2.28: Procedimiento de desbaste fino.

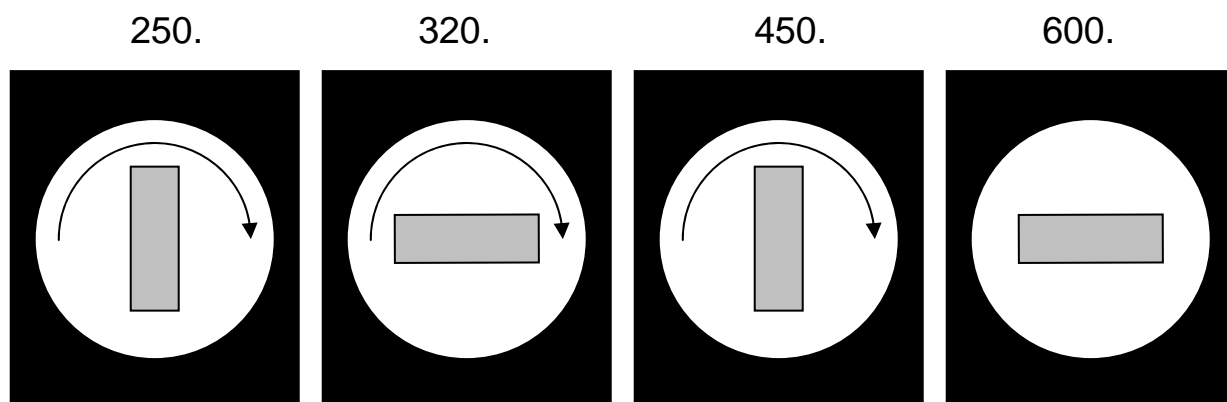


Figura 2.29: Giros durante el desbaste.

Pulido.

Esta etapa consiste en quitar las remanencias que quedan en la superficie durante la etapa de desbaste fino para alisar finamente la superficie para así darle la brillantes que necesita la misma para que se pueda ver su estructura en el microscopio, existen diversos productos para pulir metales entre los que tenemos sustancias en polvo, en solución acuosa.

Estos productos se frotan contra la superficie mediante un paño de franela tipo billar, el cual mientras se frota se debe mojar con agua, éste proceso se realiza durante un determinado tiempo, alrededor de 30 minutos, este tiempo dependerá del producto usado y de la calidad del pulimento de la superficie, generalmente; la superficie pulida en el microscopio, se ve como se muestra en la figura 2.30:



Figura 2.30: Equipo para pulido fino.

Ataque químico.

Para ver la estructura en el microscopio, no basta con solo el pulido de la superficie, se debe atacar químicamente la muestra para poder revelar su estructura interna, en algunos casos, hay metales a los que se les puede ver su estructura con solo el pulido, pero la gran mayoría de metales requieren de un reactivo químico que ataque la superficie del metal para poder revelar su estructura interna.

Para cada tipo de aleación, existe un tipo de reactivo, a continuación se presenta una tabla de los diferentes reactivos químicos para cada tipo de aleación:

Tabla 2.3: Reactivos para examen microscópico.

Reactivo.	Composición.	Uso.	Observaciones.
Ácido nítrico. (nital).	Ácido nítrico blanco 1 – 5 mL. Alcohol etílico o metílico al 98 % También alcohol amílico. 100 mL.	En aceros al carbono: a). Para oscurecer la perlita y dar contraste entre colonias de perlita. b). Para revelar frontera de perlita. c) Para diferenciar la perlita de la martensita.	La rapidez de ataque aumenta, la selectividad disminuye y se incrementan los porcentajes de HNO_3 . El reactivo 2 (ácido pícrico) generalmente es superior. El tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto.
Ácido pícrico. (picral).	Ácido pícrico, 4 gr. Alcohol etílico o metílico la 98 % 100 mL.	Para todos los grados de aceros al carbono recocidos, templados, revenidos, esferoidizados y austenizados. Para todos los aceros de baja aleación atacados por este reactivo.	Ocasionalmente útiles para soluciones más diluidas. No revela las fronteras de grano de la ferrita tan fácilmente como el nital, el tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto o más.
Cloruro férrico y ácido hidroclicó.	Cloruro férrico, 5 gr. Ácido hidroclicó, 50 mL. Agua, 100 Ml.	Aceros auténticos y aceros inoxidables.	

Tabla 2.3: Reactivos para examen microscópico (continuación).

Reactivo.	Composición.	Uso.	Observaciones.
Hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno.	Hidróxido de amonio 5 partes Peróxido de hidrógeno 2 a 5 partes.	Generalmente empleado para cobre y muchas de sus aleaciones.	El contenido de peróxido varía directamente con el contenido de cobre de la aleación que será atacada. Inmersión o frotamiento por casi un minuto, usar peróxido fresco para mejores resultados.
Persulfato de amonio.	Persulfato de amonio, 10 mg y Agua, 90 mg.	Cobre, latón, bronce, plata, níquel y bronce alumínico.	Utilizarlo frío o hirviendo, inmersión.
Reactivo Palmerton.	Óxido crómico, 200 gr. Sulfato de sodio, 5 gr. Agua, 1000 mL.	Reactivo general para zinc y sus aleaciones.	Inmersión con agitación moderada.
Molibdato de amonio.	Ácido molibdico al 85% 100 gr. Hidróxido de amonio (gr. esp. 09) 140 mL. Agua, 240 mL. Filtrar y añadir al ácido nítrico(gr. esp. 1,32) 60 mL.	Ataque rápido para plomo y sus aleaciones, muy apropiado para remover la capa gruesa de metal trabajado.	Frotar la muestra y lavar bajo chorro de agua de manera alternada.
Ácido hidrofúorico.	Ácido hidrofúorico (conc), 0,5 mL. Y Agua, 99,5 mL.	Examen microscópico general para aluminio y sus aleaciones.	Frotar algodón suave por 15 segundos.

Micrografía.

Esta etapa consiste en tomar una foto de la microestructura que se observa en el microscopio para obtener un registro para su posterior análisis, el equipo que se usa para este proceso es el microscopio con un dispositivo al cual se le adhiere una cámara fotográfica que se encarga de registrar lo que se observa en dicho microscopio. A este equipo se le suele llamar “banco metalográfico” éste se puede apreciar en la figura 2.31:



Figura 2.31: Banco metalográfico.

En la industria, actualmente existen equipos muy sofisticados, los cuales consisten en un microscopio al cual va adherida una cámara digital que toma fotografías y videos simultáneamente y que a la vez, está conectada a un computador donde se pueden guardar las fotografías que dicha cámara pueda registrar, a continuación se muestra este tipo de banco metalográfico moderno en la figura 2.32:



Figura 2.32: Banco metalográfico computarizado.

En los bancos metalográficos se pueden apreciar estructuras de los metales que ven como se muestran en la figura 2.33.

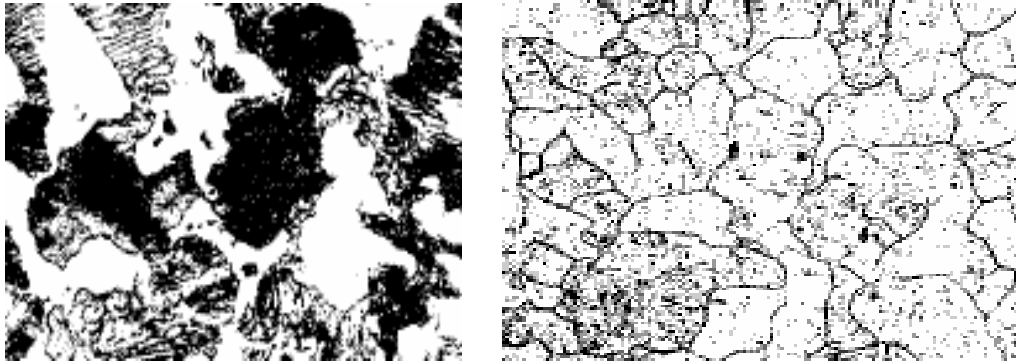


Figura 2.33: Micrografías de muestras de un acero de bajo carbono (izquierda) y del hierro puro (derecha).

Análisis metalográfico.

El último paso de una metalografía es el análisis, luego de realizados todos los pasos, desde el corte de la muestra hasta la micrografía, se procede a hacer el análisis, este se realizará según la aplicación que se requiera hacer, en general; las principales aplicaciones del análisis metalográfico en el campo de la metalurgia, son las siguientes:

- . Control de procesamiento de los materiales.
- . Control de calidad de los materiales.
- . Análisis para la prevención de fallas en los materiales.

El análisis de cada una de estas aplicaciones, es muy profunda como para pretender abarcarlas en este proyecto, por lo que se mencionará de manera muy breve, algunos ejemplos de aplicación de esta técnica y se orientará el análisis hacia la primera y segunda aplicación durante este proyecto específicamente a los procesos que se van a desarrollar.

En el control de procesamiento de materiales, la técnica metalográfica se utiliza para controlar las operaciones mediante la determinación de los cambios estructurales que se producen en los metales antes, durante y después de los diferentes procesos a los que son sometidos los metales al momento de ser fabricados, por ejemplo; en el proceso de temple antes del proceso, un acero de bajo carbono hipo eutectoide 1045 debería mostrar una estructura denominada perlita más ferrita alfa, durante el temple, la estructura de este acero debiera llegar a formar otra estructura denominada austenita; después del temple, sin duda se formara en este acero, otra estructura llamada martensita la cual le confiere dureza esperada al final proceso de temple.

Mediante el conocimiento de las estructuras que se forman en cada etapa del proceso, el antes, durante y después, se puede controlar el proceso, si se forma una estructura no esperada y se observa en el microscopio, entonces algo está pasando, esto hace que se detenga el proceso y se realice el respectivo análisis antes de seguir procesando el material, mediante este análisis se predice y previene cualquier error en el proceso. Lo que a futuro pueda evitar una falla en el material que produzca consecuencias más grave, en lo referente al control de calidad de materiales, el análisis nos sirve para identificar materiales, en el caso del acero existen los manuales de la American Society for Material (ASM) dentro de los cuales viene un tomo que contiene un atlas de la micrografía de todos los aceros y otras aleaciones, observando la estructura de un acero en el microscopio, se puede identificar el tipo de acero que se ve, realizando una comparación óptica entre dicho acero y la micrografía que aparece en el atlas de la ASM.

Por último, el término Hipo eutectoide, se refiere a una de las formas de clasificar los aceros, entre las cuales existen varias formas, una de ellas es la clasificación según el contenido de carbono, según ésta; los aceros se pueden denominarse eutectoides (0,8% de carbono), hipoeutectoides (menos de 0,8% de carbono) e hiper eutectoides (más de 0,8% de carbono). El termino Austenita, perlita y ferrita alfa se refiere a fases sólidas en estado de equilibrio las cuales están asociados a enfriamientos muy lentos, el termino martensita se refiere a una fase sólida en estado de no equilibrio que está asociada a un

enfriamiento muy rápido, más adelante explicaremos a detalle lo referente a esta terminología, por el momento; solo ilustramos lo necesario para que se pueda entender de manera clara lo anteriormente expuesto en esta parte. La técnica metalográfica, tiene otras aplicaciones tales como la medición del tamaño de grano para control de procesos, detección de contaminantes (inclusiones), detección de elementos nocivos para los metales tales como el Hidrógeno en el acero el cual genera que el acero falle por fragilización.

2.3. Tratamientos térmicos del acero.

- Generalidades sobre los tratamientos térmicos.

La ciencia e ingeniería de materiales basa sus estudios principalmente en tres aspectos, la estructura interna, las propiedades y los procesos con los que se fabrican los materiales, esto se ilustra bien en la figura 2.34:

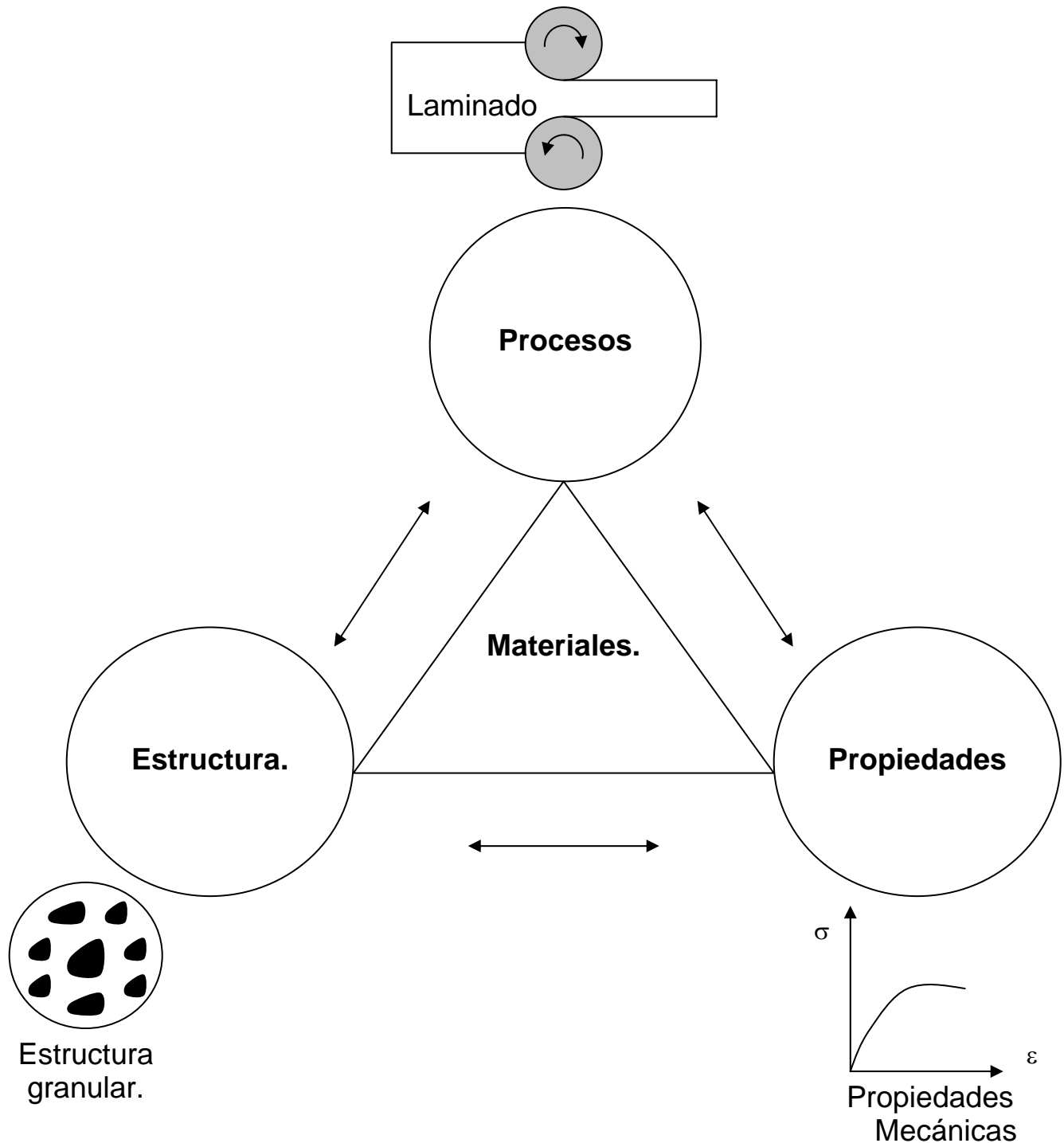


Figura 2.34: Relación Estructura – propiedad – proceso.

A continuación, veremos en forma breve, los detalles de cada uno de estos aspectos de la relación enfocados a los tratamientos térmicos.

Estructura: La estructura interna de un material se puede ver desde varios niveles, estos niveles son: estructura atómica, estructura cristalina, estructura granular y diagrama de fases. A continuación se presenta en la figura 2.35 un ejemplo de cada nivel:

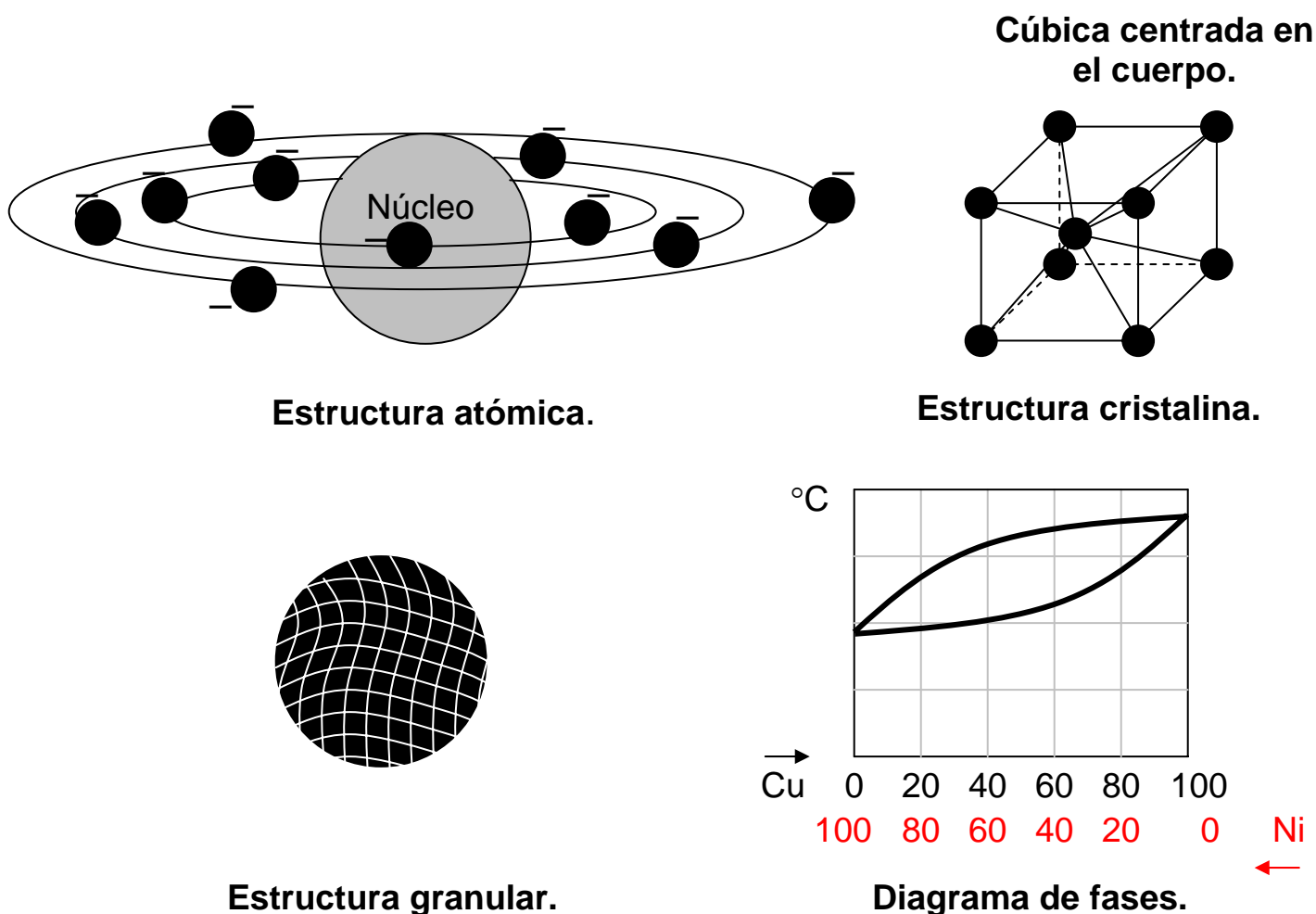
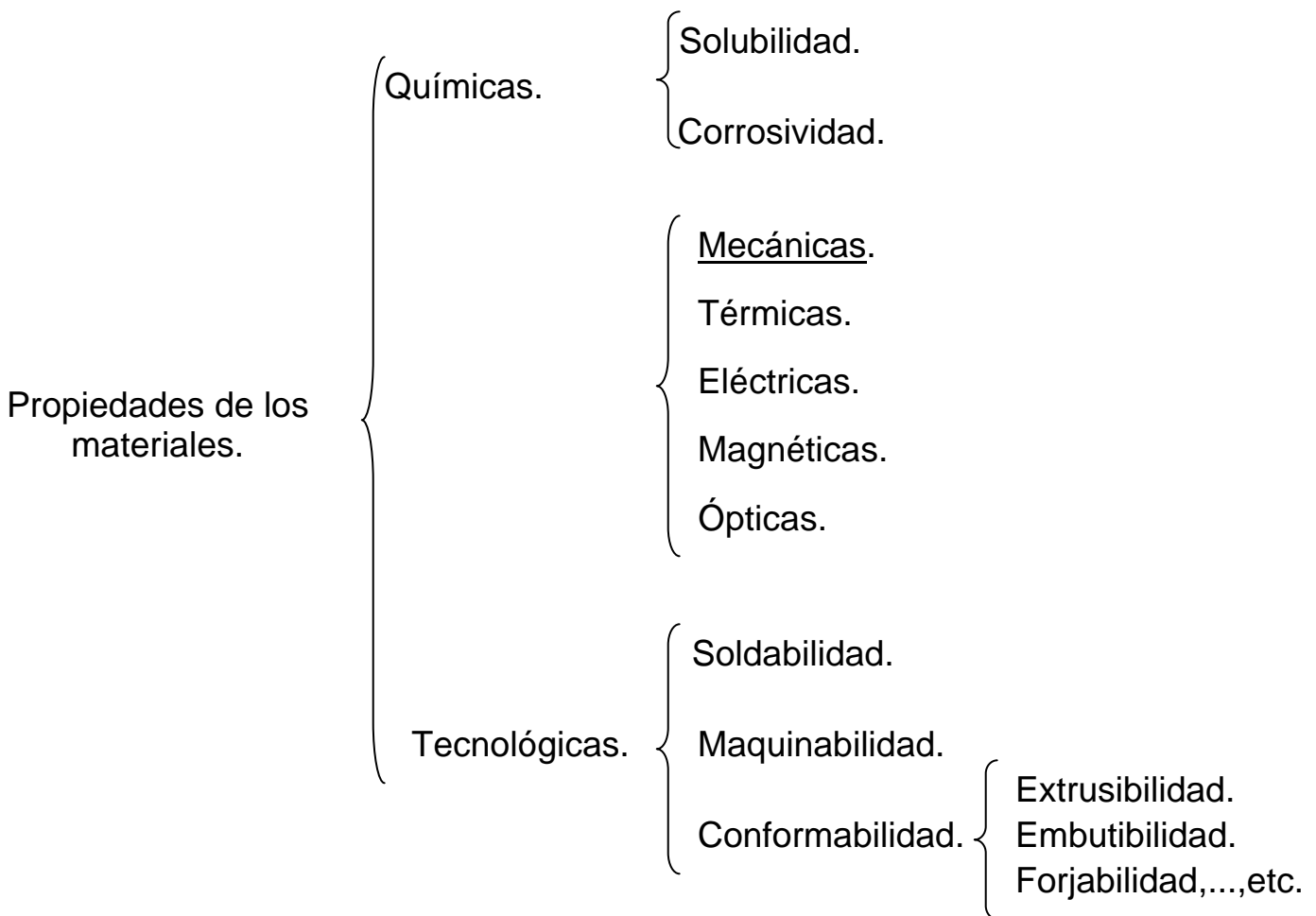


Figura 2.35: Niveles de estructuras de los materiales.

Propiedades: Las propiedades son las características que presenta un material bajo ciertas condiciones de operación, las propiedades pueden ser físicas, químicas y tecnológicas. Dos ejemplos de propiedades químicas pueden ser la solubilidad y la corrosividad o degradabilidad de los materiales, las propiedades físicas son las mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas.

Las propiedades tecnológicas son la soldabilidad, maquinabilidad y la conformabilidad, la cual es llamada según el proceso que se realiza, por ejemplo, para la extrusión, a la conformabilidad se le suele llamar extrusibilidad, o bien; para el embutido se llama embutibilidad, en el siguiente esquema se resume bien las propiedades de los materiales:

Esquema 2.2: Propiedades de los materiales.

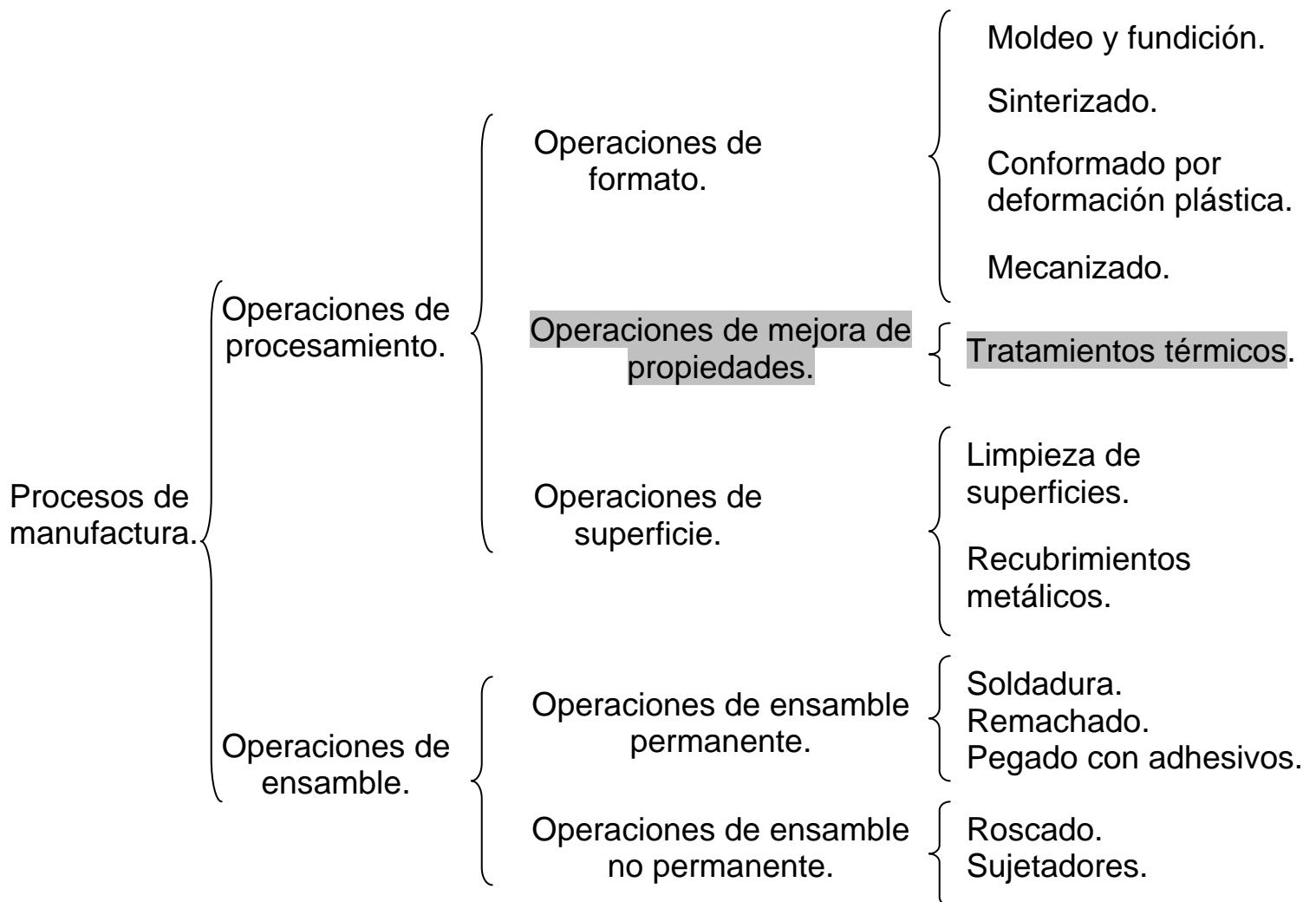


De todas las propiedades hasta ahora mostradas, solo nos concentraremos en las propiedades físicas, específicamente las mecánicas con un especial énfasis en la dureza.

Procesamiento: Con los procesamientos se producen la forma deseada en el material.

Dentro del campo de los materiales, encontramos dos tipos principales de procesos de manufactura, estos son las operaciones de procesamiento y las de ensamble, dentro de las operaciones de procesamiento encontramos también; las operaciones de formato, mejora de propiedades y las operaciones de superficie. Dentro de las operaciones de ensamble encontramos a su vez, las operaciones de unión permanente y las operaciones de unión no permanente, el esquema siguiente muestra los diferentes tipos de procesos de manufactura que se pueden encontrar en el campo de los materiales.

Esquema 2.3: Procesos de manufactura.



De todos los procesos que hemos mencionado el proceso del que se hablará en este proyecto será el proceso de manufactura que involucra la operación de mejora de propiedades, es decir que los procesos que aquí vamos a exponer serán los procesos de tratamientos térmicos, específicamente los tratamientos de recocido, temple, revenido y cementado los cuales expondremos a detalle más adelante. Del diagrama de relación estructura – propiedad – procesos, se puede afirmar que si se modifica uno de los tres aspectos, se modificarán automáticamente los otros dos aspectos, esto debido a que los cambios que sufre un material en su estructura, genera un cambio en las propiedades, esto porque ambos aspectos de los materiales están muy relacionados entre si, lo mismo sucede a la inversa, si se cambian las propiedades en un material, automáticamente cambiará su estructura.

Todo material en su fabricación involucra un proceso el cual al trabajar sobre el mismo, genera cambios en su estructura por ende los genera también en su propiedades, por lo que para cada tipo de proceso hay una estructura asociada con sus respectivas propiedades, para cada proceso, estructura y propiedad se puede hacer un diagrama que contenga su relación de estructura – propiedad – proceso. Por ejemplo, para el caso de este proyecto el diagrama que puede hacerse para el proceso de temple y revenido puede ser el mostrado en la figura 2.36:

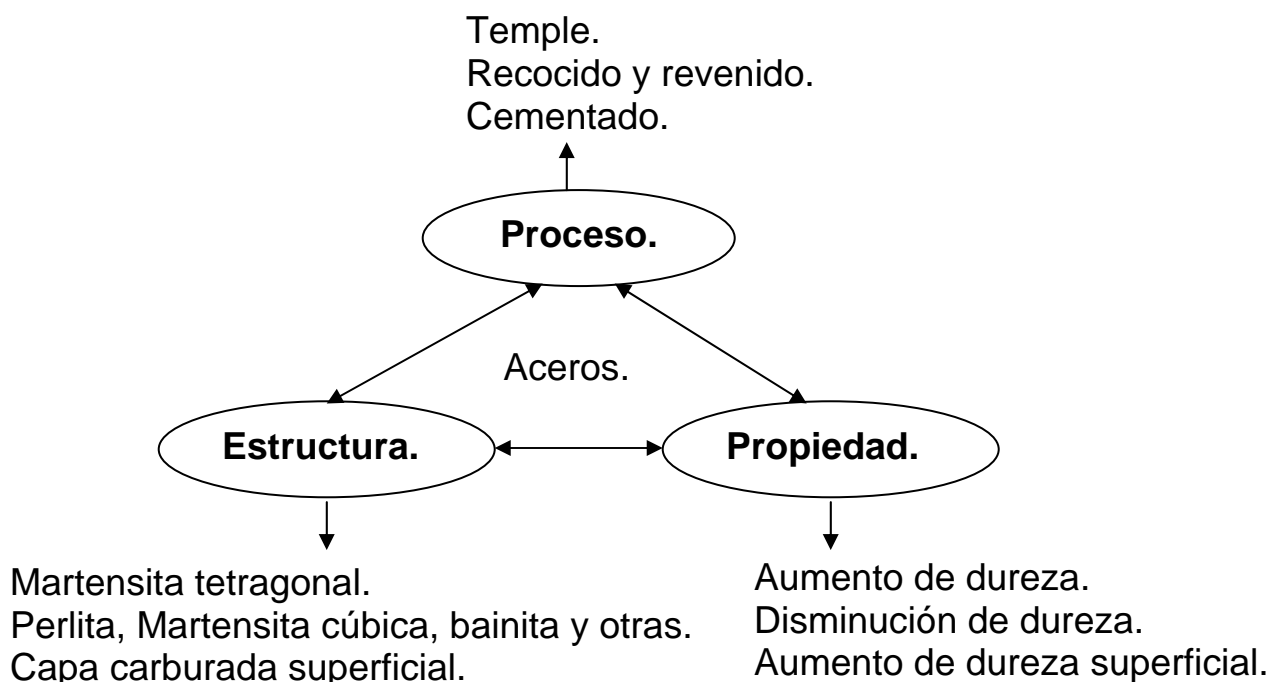


Figura 2.36: Relación estructura – propiedad – proceso para temple, revenido y cementación.

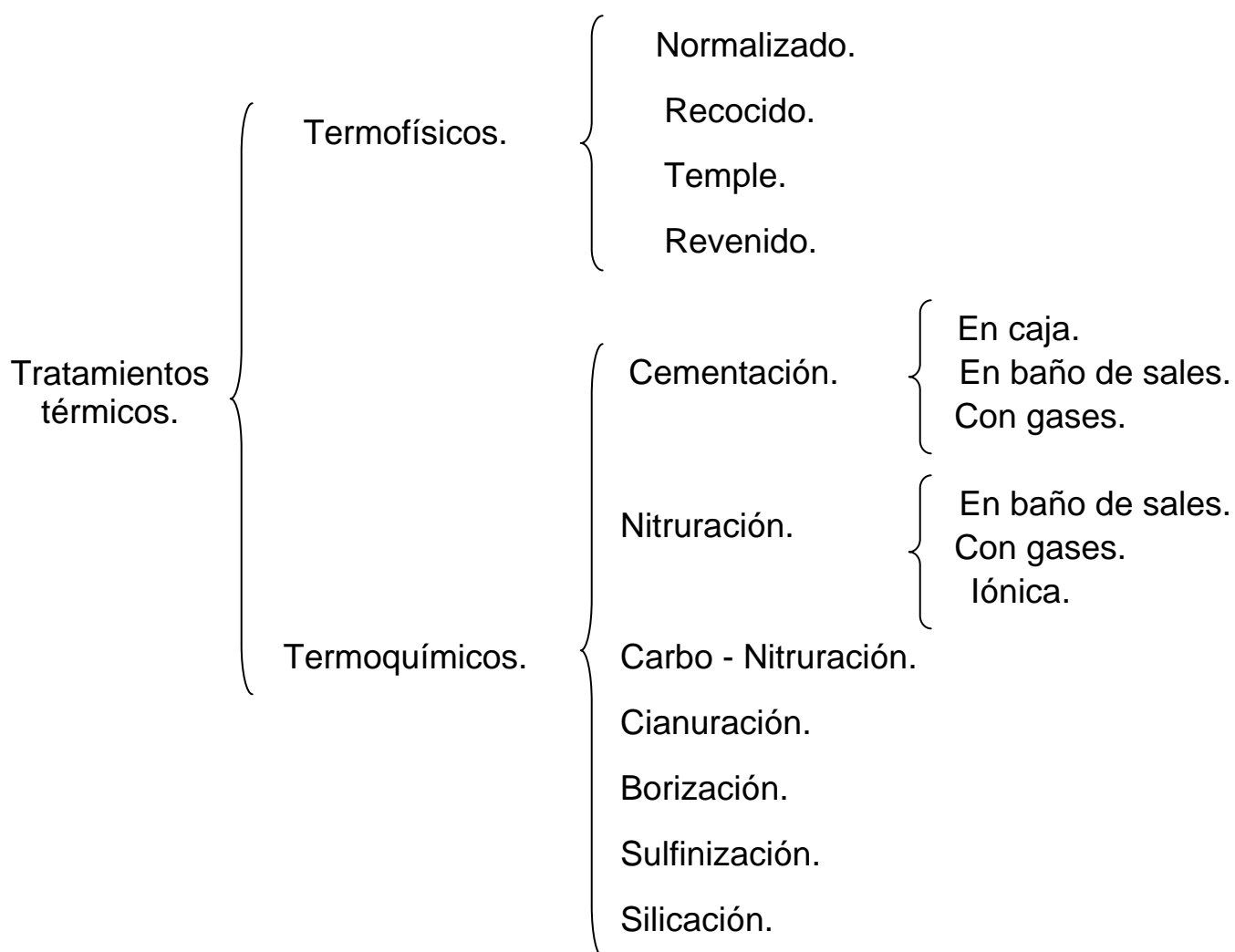
Y así sucesivamente se puede hacer un diagrama para cada tipo de proceso, a continuación estudiaremos los aspectos estructurales de los aceros. Por tratamientos térmicos se entiende que son un conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento que persiguen el fin de conferirle a las piezas tratadas, las propiedades deseadas, que generalmente; en el caso del acero, es el endurecimiento o ablandamiento del mismo, esto para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas para que puedan tener un buen desempeño bajo condiciones de servicio.

La forma de clasificar los diferentes tipos de tratamientos térmicos es muy variada, pero una forma válida es clasificarlos según su mecanismo de endurecimiento, con esta forma de clasificación se encuentran dos tipos principales de tratamientos térmicos, al primer tipo se les llama tratamientos termofísicos, que son aquellos en los que el acero se endurece por una transformación de fase en estado sólido, dentro de este tipo de tratamientos encontramos cuatro tipos más, los cuales son, el normalizado, el recocido, el temple y el revenido. De todos estos procesos solo nos concentraremos en el recocido (especialmente en el de alivio de tensiones para dar una mejor maquinabilidad), en el temple y en el revenido.

El segundo tipo de tratamiento, se les llama tratamientos termoquímicos, que son aquellos que generan un endurecimiento en la superficie de las piezas como consecuencia de una reacción de difusión entre la superficie de la misma y el medio en que esté inmersa, dentro de estos tratamientos hay una gran variedad de tipos, pero los más conocidos en la industria del acero son la cementación, la cual puede ser sólida, líquida y gaseosa, la nitruración que puede ser líquida y gaseosa, la cianuración que es líquida, la borización, la sulfinización y la silicación. De todos estos procesos, sólo veremos el proceso de cementación sólida o en caja que se tratará de implementar como proceso nuevo dentro de la empresa. Este tipo de tratamientos consiste en meter la pieza en un medio que puede ser sólido, (carbón), líquido (Baño de sales) o gaseoso, el primer paso es llevar este medio a la temperatura adecuada para que pueda difundir átomos, estas temperaturas son variadas, pero generalmente no pasan de 600 °C en la mayoría de los casos, una vez a la temperatura de proceso, se sumerge la pieza cuya superficie empieza a reaccionar con este medio por lo que se genera un cambio en la composición

química de la superficie de la pieza, formando una capa de material muy duro el cual le da resistencia al desgaste manteniendo el núcleo tenaz. La resistencia al desgaste de la pieza está determinada por el espesor de capa y, el espesor de capa está determinado por el tiempo de tratamiento, a mayor tiempo, se formará un mayor espesor de capa, a mayor espesor de capa, mayor será la durabilidad por resistencia al desgaste. Las aplicaciones de este tipo de tratamientos en la industria es amplia. Los procesos de tratamientos ya descritos se pueden visualizar en el esquema 2.3.

Esquema 2.4: Procesos de tratamientos térmicos.



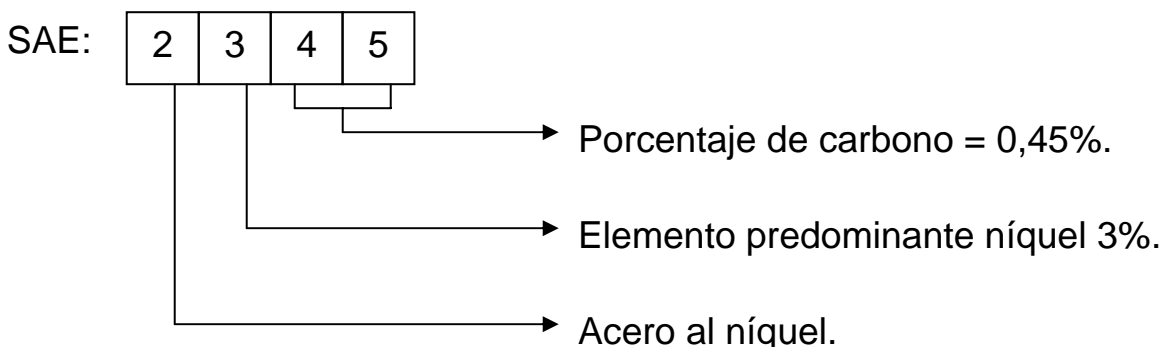
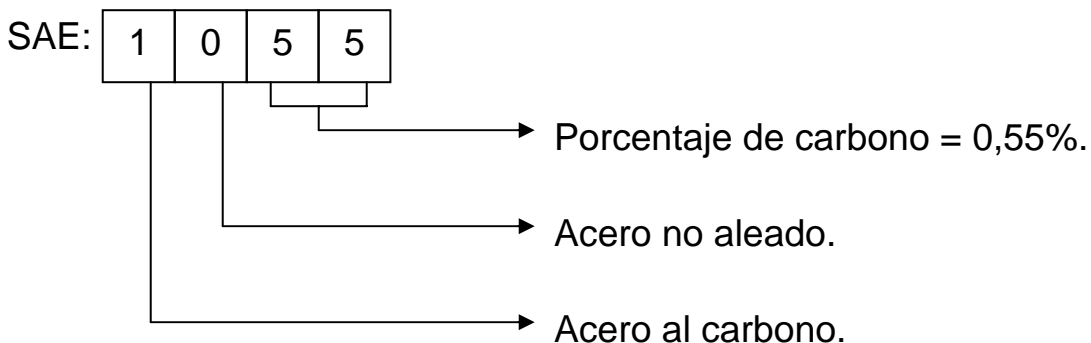
Previo a los tratamientos térmicos, se hace necesario mencionar sobre los aceros y su forma de clasificarse.

. Clasificación de los aceros.

Clasificación según normas SAE / AISI.

Las normas establecidas por la SAE (Society of Automotive Engineers) sociedad de ingenieros automotores, indican la composición y clasificación de los aceros. El sistema numérico de las normas SAE, está compuesto por cuatro o cinco cifras que significan lo siguiente: La primera cifra de la norma indica la clase de acero, así el número "1" significa aceros al carbono, el número "2" significa aceros aleados al níquel, el número "3" significa aceros al cromo níquel, el número "5" significa aceros al cromo...etc. (ver la tabla 1). El segundo número indica el porcentaje aproximado del elemento de aleación predominante, las últimas cifras indican el promedio del contenido de carbono en centésimos de porcentaje; cuando este último es igual o pasa del 1%, el sistema pasa a componerse por cinco cifras.

Ejemplos:



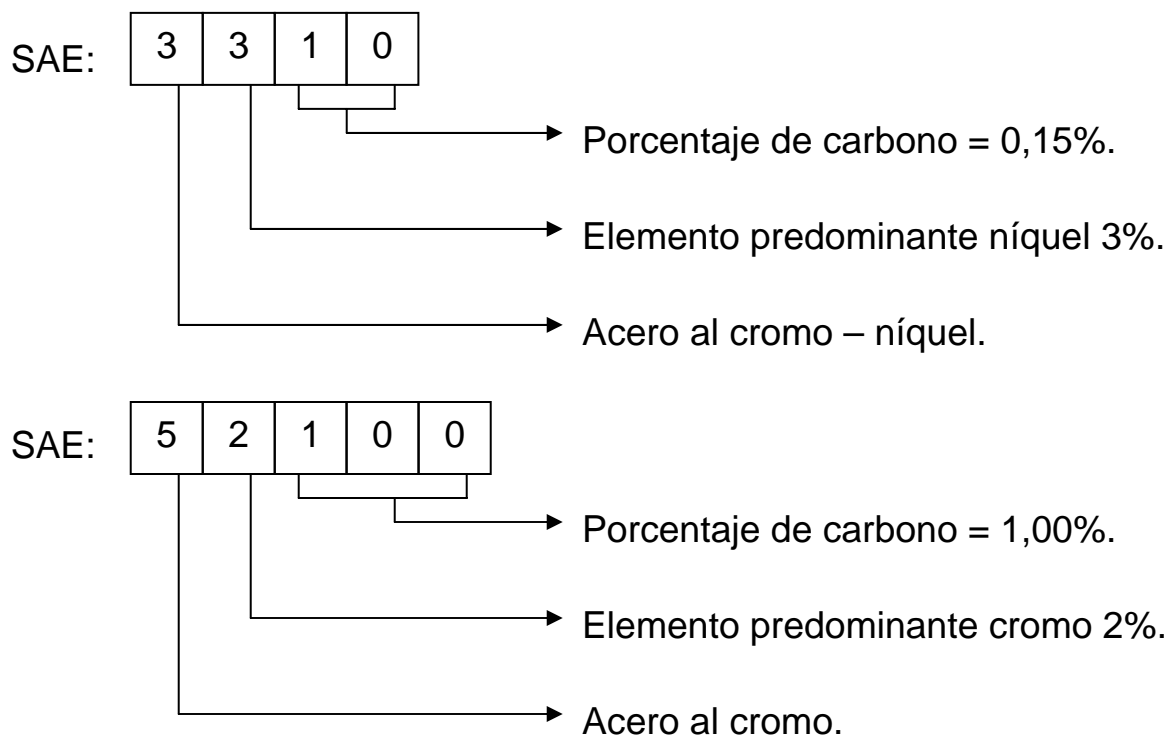


Tabla 2.4: Clasificación y composición de los aceros SAE.

Tipo de acero.	Número SAE.
Aceros al carbono.	1...
Aceros no aleados.	10..
Aceros de viruta corta, resulfurados	11..
Aceros refosforados y resulfurados.	12..
Aceros al manganeso.	13..
Aceros al níquel.	2...
Aceros.	23..
Aceros al níquel	25..
Aceros al cromo – níquel.	3...
Aceros al cromo – níquel.	31..
Aceros al cromo – níquel.	32..
Aceros al cromo – níquel.	33..
Aceros inoxidables y refractarios.	30..
Aceros al molibdeno.	4...
Aceros al carbono – molibdeno.	40..

Tabla 2.4: Clasificación y composición de los aceros SAE (continuación).

Tipo de acero.	Número SAE.
Aceros al cromo – molibdeno.	41..
Aceros al cromo – níquel – molibdeno.	43..
Aceros al níquel – molibdeno.	46..
Aceros al níquel – molibdeno.	48..
Aceros al cromo.	5...
Aceros de bajo contenido de cromo (para rodamientos).	501..
Aceros de mediano contenido de cromo (para rodamientos).	511..
Aceros en alto contenido de cromo (para rodamientos).	521..
Aceros inoxidables.	52..
Aceros al cromo – vanadio.	6...
Aceros al silicio – manganeso.	9...
Aceros al silicio – manganeso.	92..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	86..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	87..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	93..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	94..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	97..
Aceros de triple aleación, cromo – níquel – molibdeno.	98..
Aceros de baja aleación y de alta resistencia.	9...
Aceros fundido inoxidables	60..
Aceros fundido refractario.	70..

Tabla 2.5: Equivalencias de aceros al carbono SAE / AISI. Barras laminadas en caliente.

AISI.	C	Mn	P	S	SAE.
C 1010	0,08 / 0,13	0,30 / 0,60	0,040 máx.	0,050 máx.	1010
C 1020	0,18 / 0,23	0,30 / 0,60	0,040 máx.	0,050 máx.	1020
C 1035	0,32 / 0,38	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1035
C 1040	0,37 / 0,44	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1040
C 1045	0,43 / 0,50	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1045

**Tabla 2.5: Equivalencias de aceros al carbono SAE / AISI
Barras laminadas en caliente (continuación).**

AISI.	C	Mn	P	S	SAE.
C 1050	0,48 / 0,55	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1050
C 1060	0,55 / 0,65	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1060
C 1070	0,65 / 0,75	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1070
C 1085	0,80 / 0,93	0,70 / 1,00	0,040 máx.	0,050 máx.	1085
C 1090	0,85 / 0,98	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1090
C 1050	0,48 / 0,55	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1050
C 1060	0,55 / 0,65	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1060
C 1070	0,65 / 0,75	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1070
C 1085	0,80 / 0,93	0,70 / 1,00	0,040 máx.	0,050 máx.	1085
C 1090	0,85 / 0,98	0,60 / 0,90	0,040 máx.	0,050 máx.	1090

Nota: El cobre y plomo, solo cuando se requiere, se les especifica como un elemento de adición de un acero normalizado.

Referencias:

B = Indica acero Bessemer ácido.

C = Indica acero de horno abierto.

E = Indica acero de horno eléctrico.

TS = Indica grados de ensayo normalizados para economizar materiales escasos, sustituyéndolos por sus equivalentes.

Tabla 2.6: Equivalencias de aceros resulfurados SAE / AISI.

AISI	C	Mn	P	S	SAE
C 1113.	0,10 / 0,16	1,00 / 1,30	0,040 máx.	0,24 / 0,33	—
C 1116.	0,14 / 0,20	1,10 / 1,40	0,040 máx.	0,16 / 0,23	—
C 1139.	0,35 / 0,43	1,35 / 1,65	0,040 máx.	0,12 / 0,20	1139.
C 1145.	0,42 / 0,49	0,70 / 1,00	0,040 máx.	0,04 / 0,07	1145.
C 1151.	0,48 / 0,55	0,70 / 1,00	0,040 máx.	0,08 / 0,13	1151.
B 1111.	0,13 máx.	0,60 / 0,90	0,07 / 0,12	0,08 / 0,15	1111.
B 1113.	0,13 máx.	0,70 / 1,00	0,07 / 0,12	0,24 / 0,33	1113.

Notas: En los aceros Bessemer ácidos no se especifica el contenido del silicio. Los aceros resulfurados no están sujetos a análisis para comprobación del azufre.

Tabla 2.7: Equivalencias de aceros aleados SAE / AISI.

AISI	C	Mn	Ni	Cr	Mo	SAE
1330	0,28 / 0,33	1,60 / 1,90	—	—	—	1330
1345	0,43 / 0,48	1,60 / 1,90	—	—	—	1345
E 2517	0,15 / 0,20	0,45 / 0,60	4,75 / 5,25	—	—	2517
3140	0,38 / 0,43	0,70 / 0,90	1,10 / 1,40	0,55 / 0,75	—	3140
E 3310	0,08 / 0,13	0,45 / 0,60	3,25 / 3,75	1,40 / 1,75	—	3310
4012	0,09 / 0,14	0,75 / 1,00	—	—	0,15 / 0,25	4012
4037	0,35 / 0,40	0,70 / 0,90	—	—	0,20 / 0,30	4037
4063	0,60 / 0,67	0,75 / 1,00	—	—	0,20 / 0,30	4063
4118	0,18 / 0,23	0,70 / 0,90	—	0,40 / 0,60	0,08 / 0,15	4118
4135	0,33 / 0,38	0,70 / 0,90	—	0,80 / 1,10	0,15 / 0,25	4135
TS 4140	0,38 / 0,43	0,80 / 1,05	—	0,90 / 1,20	0,08 / 0,15	—
TS 4150	0,48 / 0,53	0,80 / 1,05	—	0,90 / 1,20	0,08 / 0,15	—
4320	0,17 / 0,22	0,45 / 0,65	1,65 / 2,00	0,40 / 0,60	0,20 / 0,30	4320
E 4337	0,35 / 0,40	0,65 / 0,85	1,65 / 2,00	0,70 / 0,90	0,20 / 0,30	—
4615	0,13 / 0,18	0,45 / 0,65	1,65 / 2,00	—	0,20 / 0,30	4615

Tabla 2.7: Equivalencias de aceros aleados SAE / AISI (continuación).

AISI.	C	Mn	Ni	Cr	Mo	SAE
4640	0,38 / 0,43	0,60 / 0,80	1,65 / 2,00	—	0,20 / 0,30	4640
4720	0,17 / 0,22	0,50 / 0,70	0,90 / 1,20	0,35 / 0,55	0,15 / 0,25	4720
4815	0,13 / 0,18	0,40 / 4,60	3,25 / 3,75	—	0,20 / 0,30	4815
5015	0,12 / 0,17	0,30 / 0,50	—	0,30 / 0,50	—	5015
5046	0,43 / 0,50	0,75 / 1,00	—	0,20 / 0,35	—	5046
5140	0,38 / 0,43	0,70 / 0,90	—	0,70 / 0,90	—	5140
5150	0,48 / 0,53	0,70 / 0,90	—	0,70 / 0,90	—	5150
E 50100	0,95 / 1,10	0,25 / 0,45	—	0,40 / 0,60	—	50100
E 51100	0,95 / 1,10	0,25 / 0,45	—	0,90 / 1,15	—	51100
8115	0,13 / 0,18	0,70 / 0,90	0,20 / 0,40	0,30 / 0,50	0,08 / 0,15	—
8615	0,13 / 0,18	0,70 / 0,90	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,15 / 0,25	8615
8630	0,28 / 0,33	0,70 / 0,90	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,15 / 0,25	8630
8660	0,55 / 0,65	0,75 / 1,00	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,15 / 0,25	8660
8720	0,18 / 0,23	0,70 / 0,90	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,20 / 0,30	8720
8740	0,38 / 0,43	0,75 / 1,00	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,20 / 0,30	8740
8822	0,20 / 0,25	0,75 / 1,00	0,40 / 0,70	0,40 / 0,60	0,30 / 0,40	8822
E 9310	0,08 / 0,13	0,45 / 0,65	3,00 / 3,50	1,00 / 1,40	0,08 / 0,15	9310
9850	0,48 / 0,53	0,70 / 0,90	0,85 / 1,15	0,70 / 0,90	0,20 / 0,30	9850

Tabla 2.8: Equivalencias de aceros al Boro SAE / AISI.

AISI	C	Mn	Ni	Cr	Mo	SAE.
TS 14B35	0,33 / 0,38	0,75 / 1,00	—	—	—	—
TS 14B50	0,48 / 0,53	0,75 / 1,00	—	—	—	—
46B12	0,10 / 0,15	0,45 / 0,65	1,65 / 2,00	—	0,20 / 0,30	46B12
50B60	0,55 / 0,65	0,75 / 1,00	—	0,40 / 0,60	—	50B60
94B15	0,13 / 0,18	0,75 / 1,00	0,30 / 0,60	0,30 / 0,50	0,08 / 0,15	94B15
94B40	0,38 / 0,43	0,75 / 1,00	0,30 / 0,60	0,30 / 0,50	0,08 / 0,15	94B40

Nota: Estos aceros contienen un mínimo de 0,0005% de Boro.

Observaciones: Las prescripciones que se detallan a continuación, son aplicables materiales que no excedan 12,9 decímetros cuadrados de sección transversal. Cuando se fija el mínimo y máximo de azufre, significa que se trata de un acero resulfurado.

Los límites de fósforo y azufre se indican a continuación para cada proceso, excepto para los aceros resulfurados.

Para horno eléctrico básico: 0,025 % máximo.

Para horno eléctrico ácido: 0,050 % máximo.

Para horno abierto básico: 0,040 % máximo.

Para horno abierto ácido: 0,050% máximo.

Salvo se indique lo contrario, el contenido de sílice es de 0,20 a 0,35%. Una vez vista la clasificación y designación de los aceros, procedemos a entrar al tema de tratamientos térmicos, empezaremos por los tratamientos termofísicos y luego veremos el tratamiento termoquímico de cementado en caja.

Tratamientos termofísicos.

- **Aspectos estructurales de los aceros en los procesos de tratamientos termofísicos.**

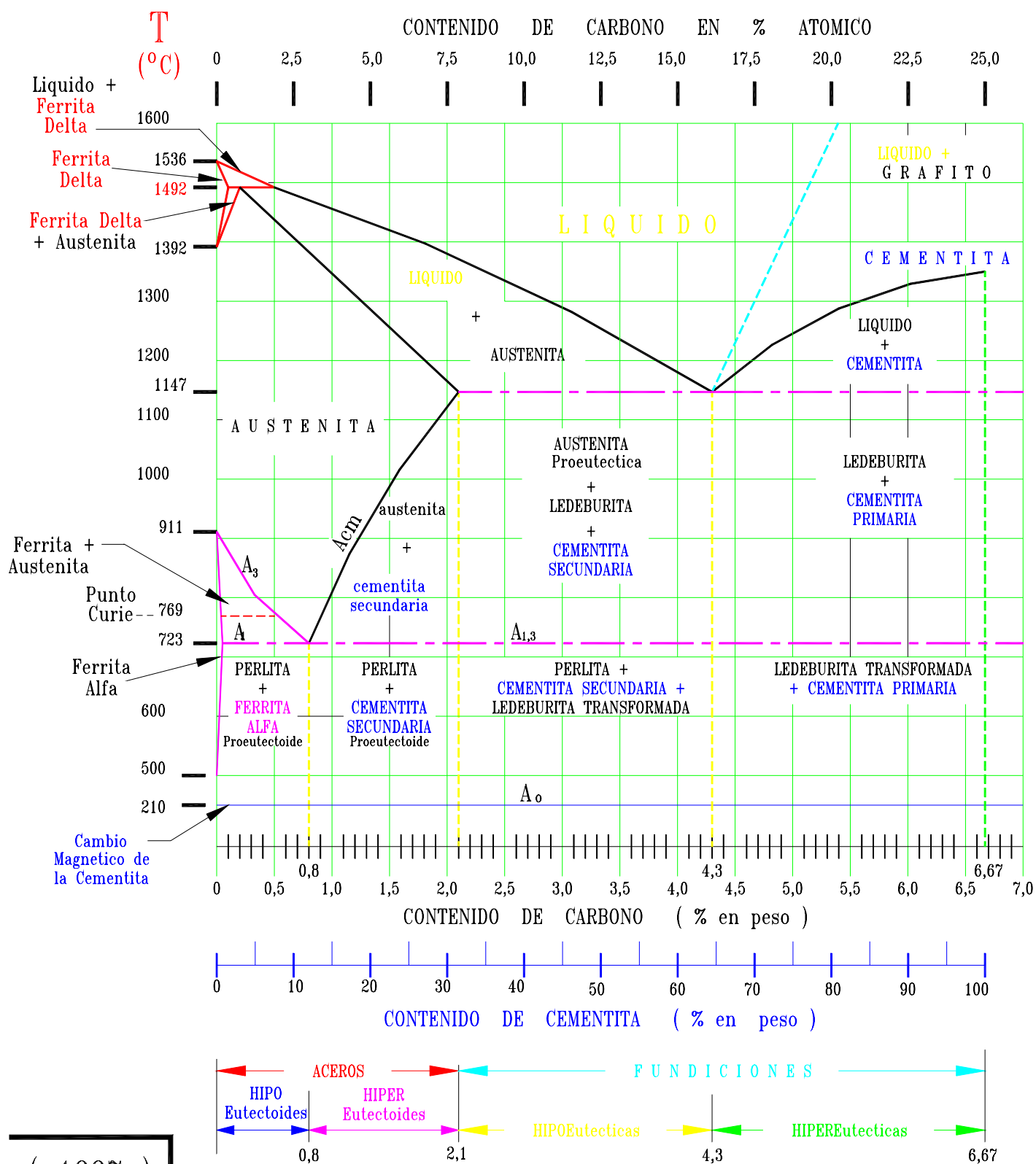
Antes de ver cada uno de los procesos de tratamientos termofísicos en sí, mencionaremos los aspectos estructurales de los aceros que se producen cuando tratamos térmicamente los mismos, como ya habíamos mencionado los tratamientos termofísicos son aquellos en los que se producen las propiedades deseadas mediante operaciones de calentamiento y enfriamiento, para este caso el calentamiento y el enfriamiento genera transformaciones de fases sólidas que generan una estructura que contiene propiedades tales como la dureza, la dureza de estas fases sólidas puede ser alta o baja según sea la transformación resultante que se genere como consecuencia de las operaciones de calentamiento y enfriamiento. Para comprender mejor esto, definiremos primero que es una fase, se entiende por fase que es porción de masa físicamente homogénea (con la misma composición química) y que tiene las mismas propiedades a lo largo de su masa. Las fases en la materia pueden ser plasma, gaseosa, líquida y sólida, en metalurgia, se estudia con mucha frecuencia las fases sólidas y sus transformaciones durante ciclos de calentamiento y enfriamiento. Los estudios sobre las transformaciones sólidas de las aleaciones se pueden comprender de forma adecuada a través de los diagramas de fases, estos en realidad son un “mapa” que nos guía para encontrar respuestas a preguntas tales como ¿qué

microestructura existe a una temperatura dada en una aleación de acero? ¿qué tan rápido se forma una microestructura a una temperatura dada? o ¿qué temperatura con respecto al tiempo pasado, dará una microestructura óptima?, preguntas como estas encuentran respuesta en estos mapas denominados diagramas de fases.

Para cada aleación hay un diagrama de fase, por lo que se puede afirmar que hay una gran variedad de ellos, entre esa gran variedad de diagramas, se encuentra el diagrama de fases de hierro – carbono, que es el que estudia y describe los detalles de transformación de fases de las aleaciones ferrosas, como se sabe el acero se encuentra dentro de esta familia de aleaciones, si se observa el diagrama de fases de la figura 2.37, las aleaciones ferrosas se dividen en dos tipos, los aceros y los hieiros fundidos, estos se pueden apreciar en la escala de las abscisas (eje x) que es representada por el contenido de carbono, se puede observar que los aceros van del 0,01 al 2% de carbono y los hieiros fundidos van del 2% al 6,67% de carbono, para este proyecto , de este diagrama, sólo mencionaremos las transformaciones de fases de los aceros, es decir; solo se trabajará con la región de los acero que se muestra en la figura 2.38.

Dentro de los aceros, por el contenido de carbono se puede ver en el diagrama que hay tres tipos, el acero eutectoide, el cual contiene 0,8% de carbono, el hipoeutectoide que contiene menos del 0,8 % de carbono (su intervalo es de 0,01 al 0,8% de C), y el hipereutectoide que contiene más del 0,8% de carbono (su intervalo va del 0,8 al 2% de C). El termino eutectoide proviene del nombre de un tipo de reacción invariante llamada reacción eutectoide y la cual se caracteriza en los diagramas de fases por tener la transformación de una fase sólida en otras dos fases sólidas diferentes como se puede apreciar en el diagrama 2.37 y 2.38, la transformación de fases sólidas del eutectoide en este caso es que la Austenita al enfriar lentamente se transforma en ferrita alfa más perlita cuando el acero es hipoeutectoide y, en perlita más cementita secundaria cuando el acero es hipereutectoide, cuando el acero es eutectoide se puede apreciar que la fase formada es perlita pura. A continuación se presenta el diagrama de fases de hierro carbono.

Diagrama Hierro Carbono. Profesor: *Ing. Jose Luis DeBriones B.*



(1997)

DIAGRAMA ESTABLE Hierro-Grafito: Temperatura Eutectica 1153 °C
Temperatura Eutectoide 738 °C

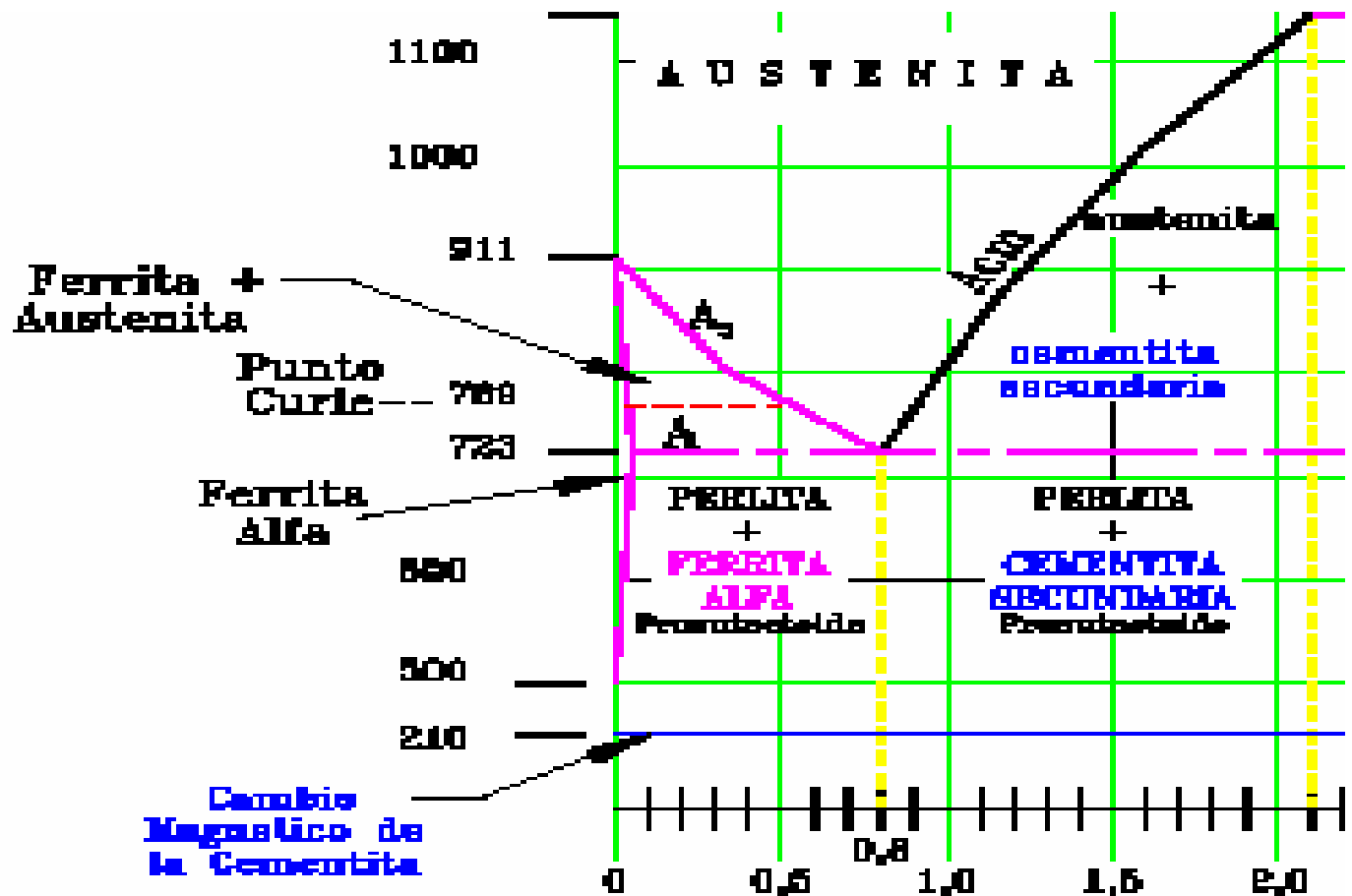


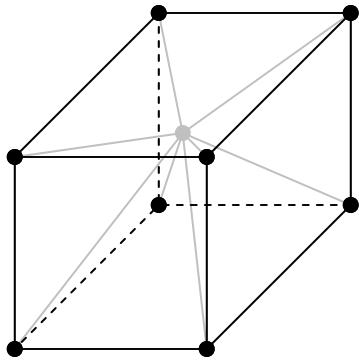
Figura 2.38: Región de aceros del diagrama de hierro carbono.

- Transformaciones de fase en el equilibrio.

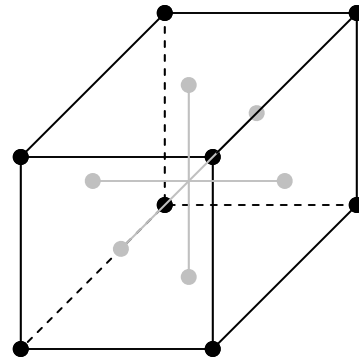
Cuando se habla de equilibrio en diagramas de fase, se habla de que la velocidad de enfriamiento es muy lenta, las transformaciones de fase sólida que se pueden ver en la figura 2.38 se producen bajo estas condiciones, todos los aceros cuando solidifican forman estructuras cristalinas, estas estructuras forman las famosas redes de Bravais, que tiene siete tipos diferentes de redes atómicas y catorce tipos diferentes de arreglos atómicos, de los cuales en el acero los principales son tres arreglos atómicos:

- . Cúbica centrada en el cuerpo.
- . Cúbica centrada en las caras.
- . Tetragonal centrada en el cuerpo.
- . Ortorrómbica centrada en el cuerpo.

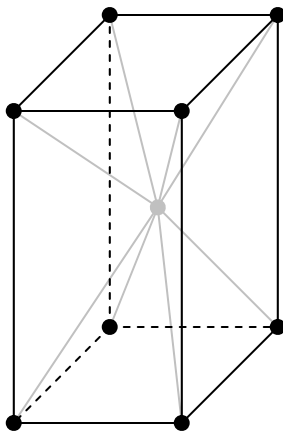
A continuación se muestran estas estructuras en la figura 2.39.



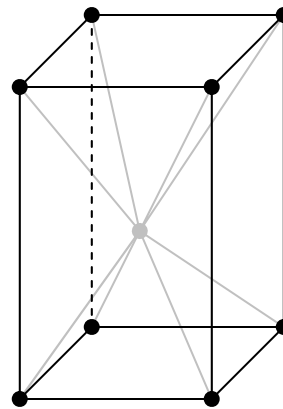
Cúbica entrada en el
cuerpo.
(B.C.C.).



Cúbica Centrada en
las caras.
(F.C.C.).



Tetragonal centrada
en el cuerpo.



Ortorrómbica
centrada en
el cuerpo.

**Figura 2.39: Principales estructuras cristalinas
formadas en el acero durante solidificación.**

Las fases ferrita más perlita y perlita más cementita tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo y, la fase austenita, tiene una estructura cúbica centrada en las caras, a esta propiedad que tienen algunos materiales de subsistir con diferentes estructuras, se le llama polimorfismo.

La estructura ortorrómbica se presenta en la cementita y la tetragonal se presenta en una fase de no equilibrio (enfriamiento rápido) llamada Martensita que veremos más adelante, Ahora se explica que son las fases sólidas del acero, por lo que procedemos a definir cada una de estas fases en equilibrio.

Ferrita: Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en el cuerpo, en general se supone que el carbono es el soluto (elemento en menor proporción) el hierro es el disolvente (elemento en mayor proporción) se le llama también como hierro alfa.

Cementita: Compuesto de hierro y carbono conocido químicamente como carburo de hierro, con fórmula química aproximada Fe_3C . Se caracteriza por tener una estructura ortorrómbica.

Perlita: Agregado laminar de ferrita y cementita que a menudo se presenta en el hierro y el acero fundido.

Austenita: Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en las caras, en general se supone que el carbono es el soluto y el hierro es el disolvente, se le llama también como hierro gamma. En la figura 2.40 se muestran unas estructuras donde pueden apreciarse estas fases.

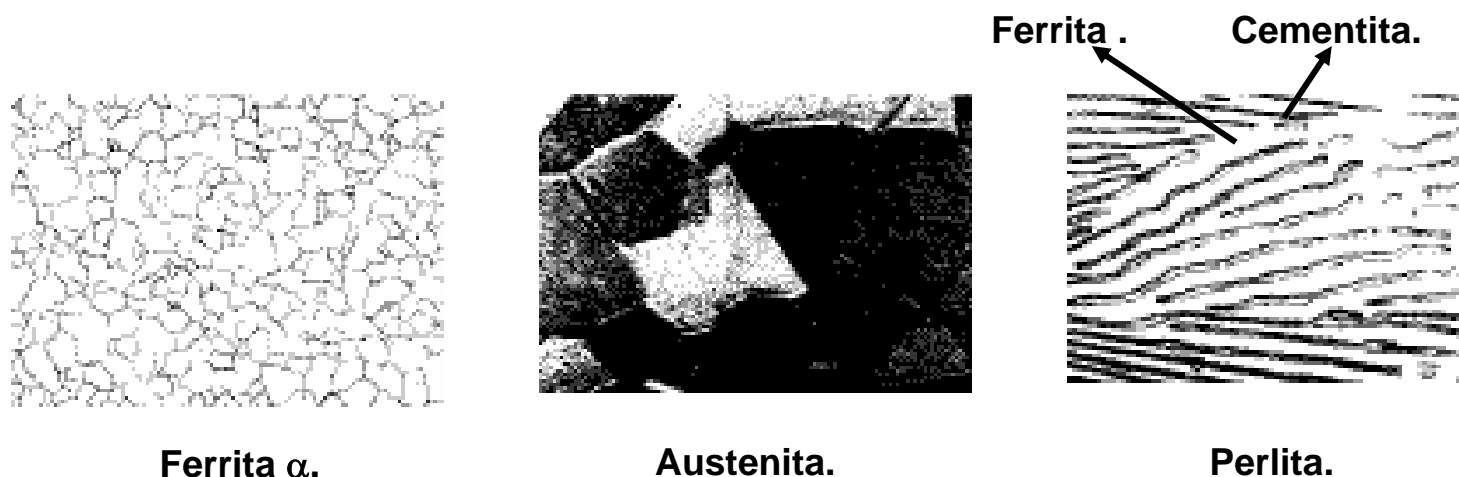


Figura 2.40: Estructuras en la que se aprecian las diferentes fases en equilibrio del acero.

Se puede observar en la figura 2.40 que en la estructura perlita, las regiones blancas corresponden a la fase ferrita y las regiones oscuras corresponden a la fase cementita. Las posibles fases de transformación del acero se pueden clasificar según la temperatura crítica de transformación de fase del acero eutectoide ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$), según esta forma las transformaciones de fase son:

- . Transformación por debajo de $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- . Transformación a $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- . Transformación por encima de $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Transformación de fases por debajo de $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cuando el acero es hipoeutectoide, si la concentración de carbono es muy baja, aproximada al 0,01% en masa de carbono, las partículas de hierro forman cristales cúbicos centrado en el cuerpo, (hierro α), cada cristal está formado por nueve iones de hierro y electrones libres, estos cristales forman granos de **ferrita**, medida que se incrementa la cantidad de carbono, este hierro y el carbono forman cristales de carburo de hierro (Fe_3C) llamado comúnmente **cementita**, cuanto más carbono contenga el acero, mayor será la proporción de cementita en la estructura, entonces los cristales de ferrita y cementita forman un conglomerado (mezcla de cristales) que, en muchos casos aparece en forma de bandas, a este conglomerado se le llama **perlita**.

Al aumentar el contenido de carbono en la estructura del acero se encuentran cristales puros de ferrita y un conglomerado de cristales de ferrita y cementita mezclados que son perlita, es así como se forma la fase ferrita más perlita de un acero hipoeutectoide, la cual se puede ver en la figura 2.38 al lado izquierdo del punto eutectoide. Si se sigue incrementando el contenido de carbono hasta llegar a 0,8% en masa de carbono, todos los cristales de ferrita se mezclan con los de cementita, formando así una composición eutectoide que tiene la temperatura de transformación más baja de todas las aleaciones de hierro – carbono ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$), esta estructura está formada por laminas finamente superpuestas, se alternan una capa de cristales de hierro (ferrita α) con una capa de carburo de hierro Fe_3C (cementita), esta estructura se llama **perlita**.

Es así como se forma la fase sólida de un acero eutectoide (**Perlita**) que se puede apreciar en la figura 2.38 justo en el punto eutectoide. Cuando la concentración de carbono sobrepasa el 0,8% de masa en carbono se producen cristales sobrantes de carburo de hierro Fe_3C que no encuentran cristales de hierro para formar granos de perlita, entonces estos cristales de carburo de hierro se acumulan para la formación de granos de perlita y se denominan carburos de cáscara o cementita secundaria, es así como se forma la fase perlita más cementita secundaria de un acero hipereutectoide que se puede ver en la figura 2.38 al lado derecho del punto eutectoide.

Transformación a 723 °C.

Cuando el acero es eutectoide, todos los granos de perlita se convierten en austenita, si el acero es hipoeutectoide, solo se convierte en austenita la perlita, la ferrita permanece como al principio, como cristales de hierro, obteniéndose así una mezcla de Austenita más ferrita, tal y como se aprecia en la figura 2.38 en la región que está por encima de la línea isoterma que pasa por 723 °C y la frontera de fase con la austenita (la curva A_3). Si el acero es hipereutectoide, los cristales han formado cáscaras duras de carburo de hierro, por lo que la perlita se convierte en austenita y queda una mezcla de cementita y austenita; tal y como se aprecia en la figura 2.38 en la región que está por encima de la línea isoterma que pasa por 723 °C y la frontera de fase con la austenita (la curva A_{cm}).

Transformaciones por encima de 723 °C.

Por encima los 723 °C, al calentar un acero, se produce una modificación en su estructura, en este caso los átomos de carbono se desprenden de los cristales de carburo de hierro y se distribuyen uniformemente entre todos los cristales, al mismo tiempo se modifica la forma de la red cristalina la cual se convierte de cúbica centrada en el cuerpo a cúbica centrada en las caras con 14 iones de hierro, esta estructura con solución sólida se denomina, **Austenita**.

Si se sigue calentando más el acero los granos se hacen cada vez más gruesos, al proceso de transformación de una fase sólida cualquiera de acero (hipo, hiper o eutectoide) a austenita se le llama austenización y al punto de la curva de la frontera de fase (líneas A_3 y A_{cm}) donde ocurre la transformación, se le llama punto de austenización. Este punto de austenización tiene asociada una temperatura como punto de ordenada (eje y) y una concentración de carbono como punto de abscisa (eje x), por ejemplo; el punto de austenización de un acero eutectoide, tiene como punto de ordenada una temperatura de 723 °C, y como punto de abscisa tiene una concentración de carbono de 0,8% en masa, esto se puede apreciar en la figura 2.38, justo en el punto eutectoide, solo se debe trazar una línea recta desde el punto a los ejes para determinar cada uno de estos puntos.

Se puede observar que para cada acero con cierta concentración de carbono, el punto de transformación a austenita es distinto, por ejemplo; el acero eutectoide se transforma 723 °C, y para los aceros hipo e hipereutectoides, su punto de austenización depende de la concentración de carbono, se puede ver claramente que el punto de austenización de un acero hipoeutectoide con 0,5% de carbono, la temperatura de austenización es alrededor de 760 °C, mientras que para el acero hipereutectoide con 1% de carbono el punto de austenización es alrededor de 800 °C.

En resumen, eso es todo lo que se puede decir de las transformaciones de fase sólida en estado de equilibrio de los aceros, al menos lo necesario en lo referente a los procesos de tratamientos térmicos. Por último, se mencionó sólo los ciclos de calentamiento pero no se mencionó nada sobre el enfriamiento, cuando el enfriamiento se da bajo condiciones de equilibrio, el resultado será el mismo que al inicio del calentamiento, por ejemplo; si un acero es calentado hasta transformarlo en austenita, al enfriarse en equilibrio (lentamente), su estado final será el mismo inicial, es decir, Ferrita más perlita, lo mismo ocurre con el acero eutectoide y el hipereutectoide. Ahora se explicará que pasa cuando la transformación de fase se produce en estado de no equilibrio.

- **Transformaciones de fase en estado de no equilibrio.**

Estas transformaciones se producen cuando las condiciones de enfriamiento son rápidas o a velocidades intermedias entre lenta y rápida, también estas transformaciones se producen en los tratamientos posteriores al formación de martensita, la estructura formada es la fase conocida como martensita revenida la cual tiene diferentes formas, estas son martensita negra, trustita y sorbita, también se encuentra otra fase sólida llamada bainita, a continuación definiremos cada una de estas fases.

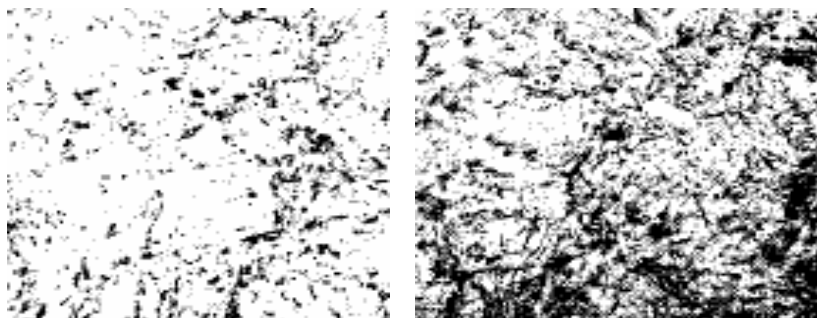
Martensita: Esta fase corresponde a una solución sólida intersticial sobre saturadas de carbono en hierro, con estructura tetragonal centrada en el cuerpo su microestructura se caracteriza por una forma acicular o tipo agujas.

Martensita negra: Esta fase se forma durante el revenido las más bajas temperaturas y se caracteriza por la formación de carburo tipo épsilon.

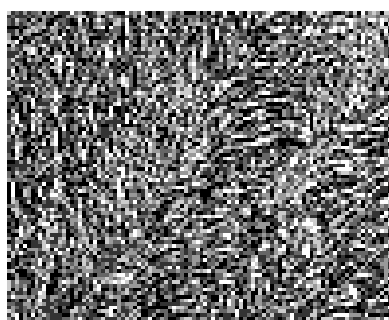
Trustita: Denominación en desuso de un agregado fino previamente indeterminable, atacable en forma rápida y química, de carburo y ferrita producido ya sea al revenir martensita a bajas temperaturas o al templar un acero a una velocidad de enfriamiento menor que la velocidad crítica de enfriamiento de temple, cuando la trustita se forma por revenido a bajas temperatura se le suele llamar martensita revenida, y cuando la trustita se forma por un temple a menor velocidad que la velocidad crítica de temple, se le suele llamar perlita fina.

Sorbita: Denominación en desuso de una fina mezcla de ferrita y cementita (perlita) producida por regulación de la rapidez de enfriamiento del acero, o reviniendo el acero después del endurecimiento, cuando la sorbita se produce por regulación de la rapidez de enfriamiento lo que la mezcla mencionada forma una perlita muy fina, esta estructura difícil de ver en el microscopio, cuando se produce por revenido después del endurecimiento lo que se produce es martensita revenida.

Bainita: Producto de descomposición de la austenita que consiste en un agregado de ferrita y carburo, en general; se forma a temperaturas inferiores a aquellas en que la martensita se empieza a formar durante el enfriamiento, su apariencia es plumosa si se forma en la parte superior del intervalo de temperatura y, acicular parecida a la martensita revenida cuando se forma en la parte inferior a dicho intervalo. A continuación, se presentan algunas estructuras de las fases en no equilibrio vistas.



Martensita de acero 0,5 (izq) y 1% (der) de C.



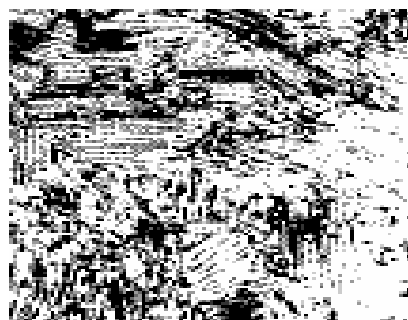
Bainita transformada.



Bainita acicular.



Bainita plumosa y perlita fina en matriz martensítica.



Perlita fina.

Figura 2.41: Fases en estado de no equilibrio.

Una vez definidas, cada una de las fases en estado de no equilibrio, se explicará como es la mecánica de transformación de estas estructuras, la mecánica para casi todas estas fases consiste en austenizar el acero y enfriar a cierta velocidad para conferirle las propiedades deseadas, por ejemplo, si se quiere endurecer el acero lo que se hace es llevar a la fase austenita este mismo, calentándolo hasta el punto de austenización + 50 grados y luego se enfría rápidamente, esta acción genera en el acero la estructura martensita que ya definimos, esta estructura debido a su sobresaturación de carbono es bastante dura. Si lo que se quiere es suavizar un acero, se austeniza este mismo, y se deja enfriando en horno, para que el acero enfríe lentamente de manera que se le forme perlita en su estructura la cual es suave.

También sucede que para suavizar un acero no necesariamente se debe llevar a la fase austenita, por ejemplo; si se calienta por debajo de la fase austenita y se le da un calentamiento prolongado de dos horas o más, a bajas temperaturas, se puede lograr suavizar el acero, por ejemplo un acero con estructura martensítica, si se calienta por dos horas a bajas temperaturas forma una estructura denominada martensita revenida la cual es relativamente suave dependiendo de la temperatura que se le aplique, aquí lo que sucede es que la martensita tetragonal pasa a ser cúbica de nuevo, lo que hace que el acero se suavice.

La martensita revenida se puede encontrar en tres formas diferentes que son la martensita negra, la trustita y la sorbita, estas formas de martensita revenida le confieren tenacidad al acero a costa de la reducción de su dureza, por otro lado; también si lo que se quiere es endurecer un acero sin que pierda su tenacidad se austeniza el acero y se enfría bruscamente en forma interrumpida, esta acción forma la fase denominada bainita, la cual le confiere al acero gran tenacidad y resistencia al impacto. Como puede verse, el secreto de los tratamientos termofísicos consiste en calentar adecuadamente el acero y generarle un determinado enfriamiento para darle al acero las propiedades deseadas, en la figura 2.42 se muestra las diferentes transformaciones de fase para un acero eutectoide que es que mejor describe las transformaciones de fase en estado de no equilibrio, también aparecen los valores de dureza y velocidades de enfriamiento para cada estructura.

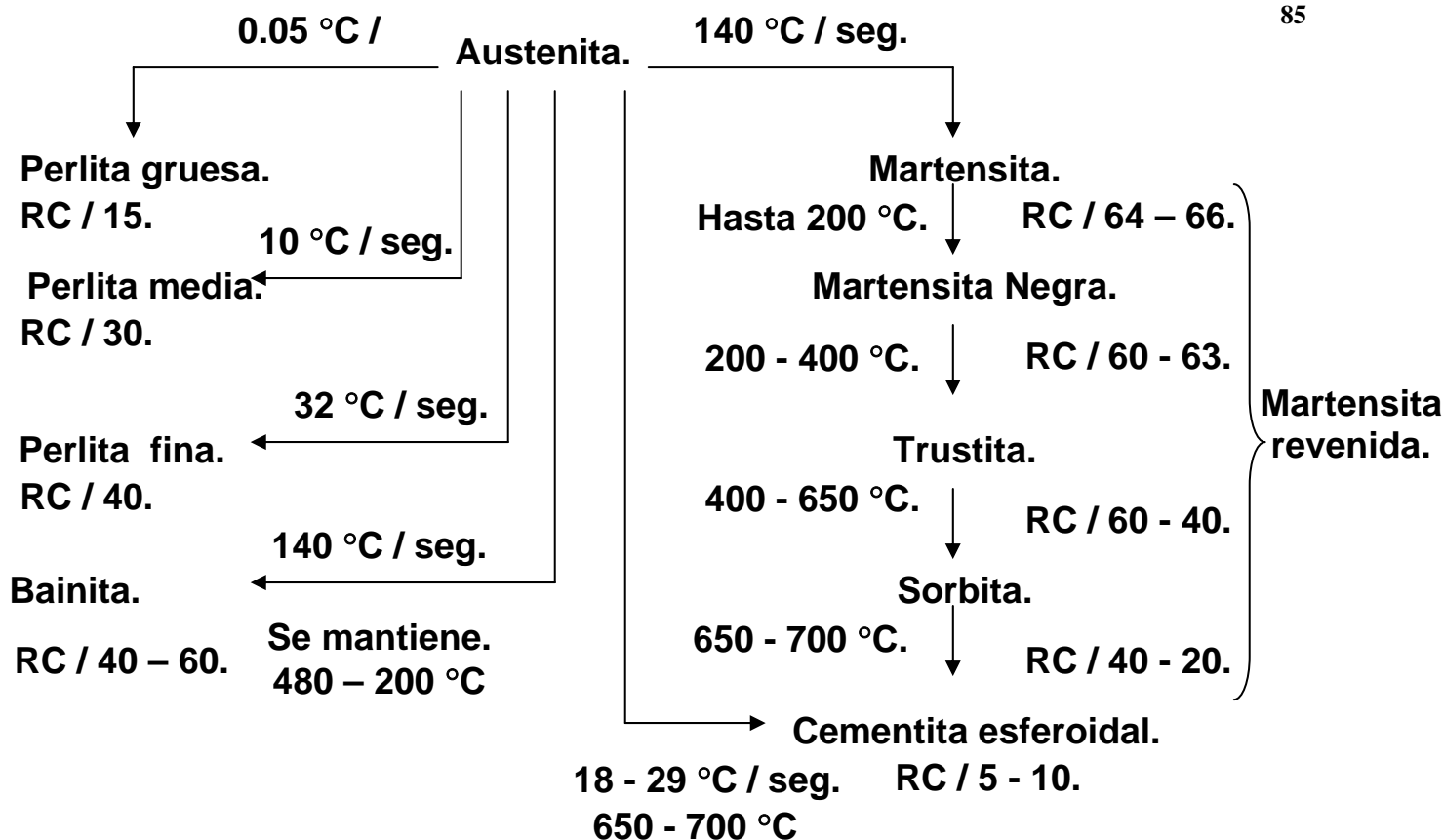


Figura 2.42: Estructuras en estado de equilibrio y no equilibrio.

Hasta ahora solo se ha mencionado las transformaciones de aceros al carbono, ahora se explicará que pasa con los aceros aleados. Con respecto a los aceros aleados la mecánica de transformaciones de fase es similar, la diferencia radica en el efecto que los elementos aleantes generan en la estructura del acero, ya que estos mueven el punto eutectoide o línea isoterma a 723 °C y la curva de frontera de fase con la austenita (curva A_{cm}) según sea el tipo de elemento de aleación. Hay dos tipos de elementos aleantes en el acero, estos son los elementos alfégenos y los gamágenos, los elementos alfégenos son aquellos que con su presencia pueden producir un aumento del dominio de la solución sólida alfa que consecuentemente reduce el dominio de la solución sólida gamma. Los elementos alfégenos son el Aluminio, Cromo, Molibdeno, Silicio, Titanio, Vanadio y Tungsteno.

Los elementos gamágenos son aquellos cuya presencia produce el crecimiento del dominio de solución sólida gamma y consecuentemente reduce el dominio de la solución sólida alfa. Los elementos gamágenos son Cobalto, Cobre Manganeso y Níquel.

En resumen, la adición de elementos alfégenos produce un incremento en la línea isoterma a 723 °C, por ejemplo; si se agrega 1% de silicio y 2% de cromo la temperatura del eutectoide se incrementara a 753 °C, lo que indica que la línea isoterma de la figura 2.38 se corrió hacia arriba 30 °C. Por otro lado, la adición de elementos gamágenos produce una disminución en la línea isoterma a 723 °C, por ejemplo; si se agrega 1% de níquel y 2% de Manganeseo la temperatura del eutectoide se disminuirá a 713 °C, lo que indica que la línea isoterma de la figura 2.38 se corrió hacia abajo 10 °C.

Hay señalar que el corrimiento de la zona de solubilidad del carbono en hierro gamma (curva A_{cm}), siempre se hará hacia la izquierda del diagrama debido a que, al añadirle elementos aleantes al acero se produce una disminución del carbono de la perlita. Por último sólo cabe mencionar como se reduce el carbono por efecto de los elementos aleantes, el carbono se reduce hasta 0,5% cuando el níquel tiene 8,7%, ó cuando el cromo tiene 4,2%, ó cuando manganeseo tiene el 2,5 % y cuando vanadio tiene 1,5%.

El cromo es el elemento que tiene un mayor efecto en los aceros ya que si se incrementa hasta el 10% de cromo, el carbono se reduce a 0,25% y si se agrega hasta el 15% de cromo, el punto eutectoide casi pega sobre el eje de las ordenadas (eje de las temperaturas) porque el carbono se reduce hasta 0,05%, de aquí se puede deducir que el cromo en el acero aumenta el dominio de los aceros hipereutectoides y disminuye el dominio de los acero hipoeutectoides. Por último cabe mencionar que la disolución de un acero hipereutectoide con un contenido de carbono dado (1% por ejemplo) exige una temperatura cada vez más elevada cuando el contenido de cromo aumenta, puede suceder que por esto, solo sea posible una solución parcial de carburos. Conocida la raíz de los fundamentos de transformaciones de fase sólida de los aceros en general, se procede a describir los procesos de tratamientos térmicos que se realizarán en este proyecto, es decir, recocido, temple y revenido, luego se verá la cementación en caja.

- **El proceso de recocido.**

Los aceros se recocen para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura particular ó para obtener propiedades mecánicas, físicas o químicas determinadas. En el caso de las aleaciones ferrosas se entiende por recocido, cuando no se hacen otras aclaraciones, a un recocido completo, se define recocido completo a una austenización seguida de un enfriamiento lento a través del rango de transformación.

Cuando se quiere indicar otra cosa diferente a un recocido completo es necesario agregar términos específicos a la palabra recocido para indicar el método de recocido o la condición del material luego del tratamiento, de esta manera se tiene recocido negro, recocido azul, recocido en caja, recocido brillante recocido a la flama, recocido intermedio, recocido isotérmico, recocido de recristalización, **recocido de ablandamiento**, recocido de terminación y recocido de esferoidización.

Los recocidos dependen de casi dos factores:

- . La formación de austenita.
- . La subsecuente transformación de austenita a temperaturas subcríticas elevadas.

Cuanto más cuidadosamente se controlen estos factores mejor será el recocido, hay diferentes tipos de recocido los cuales los más conocidos son:

- . Recocido de regeneración.
- . Recocido de recristalización.
- . Recocido de normalización.
- . Recocido de ablandamiento.
- . Recocido Isotérmico.

De todos estos tipos de recocido, solo mencionaremos el aplicado en este proyecto el cual es el recocido de regeneración.

Recocido de regeneración: Conocido también como recocido de alivio de tensiones, consiste en calentar el acero a una temperatura menor que A_1 ($< 723\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 2.38), la mayoría de las veces también inferior a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, luego se enfría lentamente con el fin de destruir las tensiones internas sin producir variaciones sustanciales en las propiedades ya existentes.

El recocido de alivio de tensiones sirve para suavizar las tensiones del mecanizado en el que no se producen variaciones de temperatura, o para suavizar aceros en estado inicialmente bonificado (templado y revenido), los cuales tienen también tensiones internas que pueden ser perjudiciales al momento de temprar las piezas sin recocer ya que esas tensiones internas durante un enfriamiento brusco son generadores potenciales de grietas en las piezas por lo que a estos aceros, se acostumbra hacerles un recocido de alivio de tensiones.

Este tratamiento consiste, para la mayoría de los aceros, en mantener tiempos de 30 a 129 minutos a temperaturas entre 550 y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ y luego enfriar lentamente en el horno, generalmente de un día a otro.

Cuando las piezas son de acero que se oxida fácilmente, deben emplearse empaquetamientos protectores o si es posible deben recocerse en hornos con atmósfera protectora. Las piezas difíciles de temprar, sensibles a las distorsiones han sufrido en un mecanizado muy intenso, deben someterse a un recocido de eliminación de tensiones después de cada arranque grande de viruta, por ejemplo; después del desbaste, con el fin de aminorar las tensiones engendradas y la tendencia a la distorsión en el tratamiento térmico final, se puede recocer la pieza durante una hora a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los procesos de tratamientos térmicos pueden representarse por diagramas de temperatura – tiempo, a continuación, se presenta el diagrama temperatura – tiempo utilizado comúnmente en este proyecto.

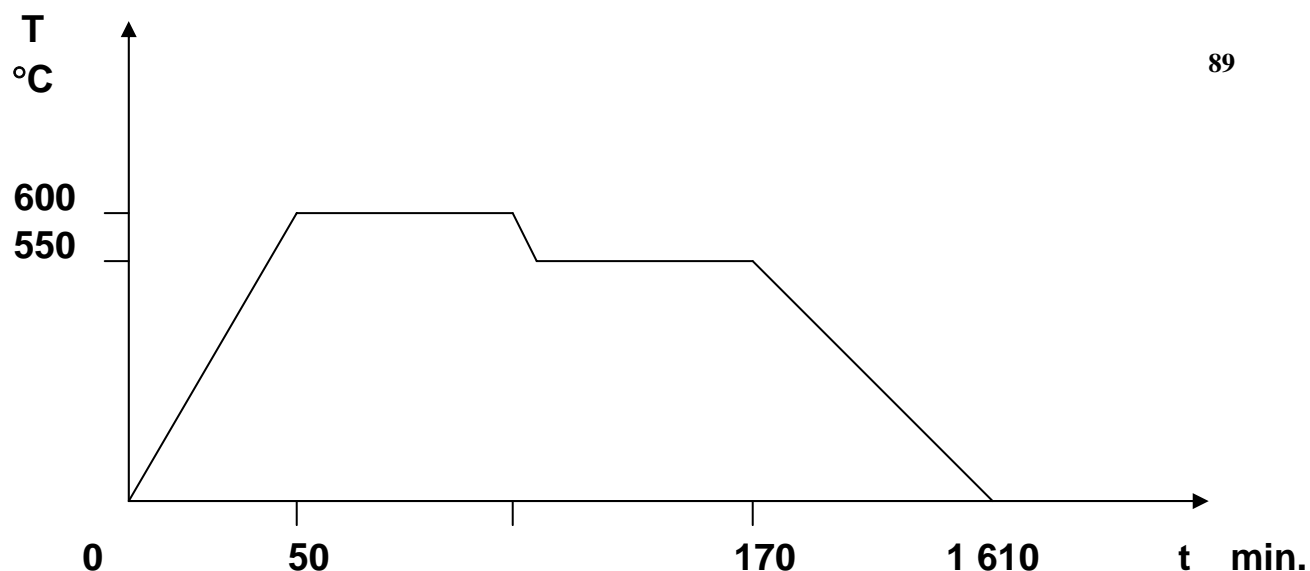


Figura 2.43: Diagrama temperatura del proceso de recocido ejecutado en taller.

- **El proceso de temple.**

El temple tiene por objeto aumentar la dureza del acero, esto se logra calentando el acero hasta austenizarlo, para luego darle un enfriamiento brusco con la finalidad de producirle una estructura martensítica, esta estructura es la que le confiere gran dureza al acero. La dureza del acero varía con el contenido de carbono, es decir; se alcanzan mayores durezas cuando más carbono tenga en su estructura, a continuación se presenta en la figura 2.44 el gráfico de la dureza en función del contenido de carbono.

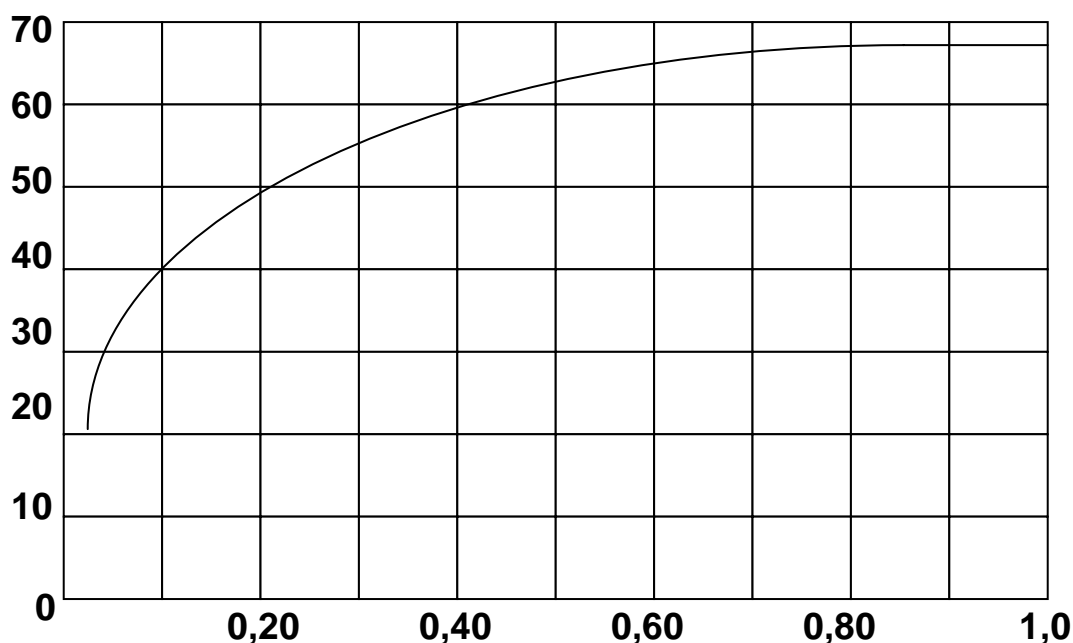


Figura 2.44: Gráfico dureza en función del contenido de carbono para aceros de bajo carbono y aleados.

Se observa que la dureza aumenta con el contenido de carbono por lo que se deduce que los aceros de muy bajo carbono son muy poco templables. El temple se da en tres etapas, estas son:

- . Calentamiento.
- . Mantenimiento a temperatura crítica.
- . Enfriamiento.

Calentamiento.

Generalmente las piezas antes de llevarlas hasta la temperatura final requerida de tratamiento, se precalientan a una temperatura comprendida entre 500 y 600 °C, esto se hace con el objeto de evitar grietas debido a las tensiones internas, las cuales se producen al introducir un acero frío en un horno que se encuentra a la temperatura de temple. Después del precalentamiento, las piezas se calientan 50 °C por encima de la temperatura de austenización.

Mantenimiento a temperatura crítica.

Una vez llegado a la temperatura de austenización se debe esperar cierto tiempo para darle chance al acero de que toda su masa se convierta a la fase austenita, la duración del calentamiento de temple varía de acuerdo al espesor de la pieza y a la composición química del acero, generalmente, los aceros de bajo carbono se mantienen 5 minutos por cada 10 mm de espesor, los aceros baja aleación se mantienen 10 minutos por cada 10 mm de espesor, y los aceros de alta aleación se mantienen 15 minutos por cada 10 mm de espesor, estas relaciones mencionadas son empíricas y se encuentran en libros de tratamientos térmicos. También existen dos ecuaciones empíricas que se pueden usar para calcular el tiempo de mantenimiento, estas ecuaciones son:

$$t = 20 + \frac{\phi(cm)}{2} \text{ minutos (cuando } \phi < 21 \text{ cm).}$$

$$t = 30 + \frac{\phi(cm)}{2} \text{ minutos (cuando } \phi > 21 \text{ cm).}$$

Por último, también se pueden usar métodos gráficos para calcular tiempos de mantenimiento, a continuación se muestra una tabla de coeficientes de forma k y su respectivo gráfico para calcular el tiempo de mantenimiento de a temperatura de austenizado una pieza.

Tabla 2.9: Coeficientes de forma “k” para cálculo de tiempos de mantenimiento para diferentes piezas.

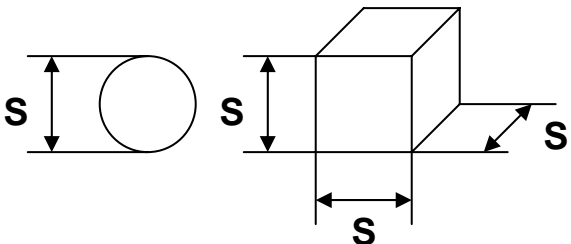
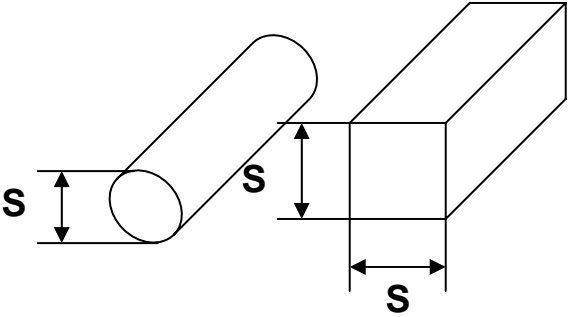
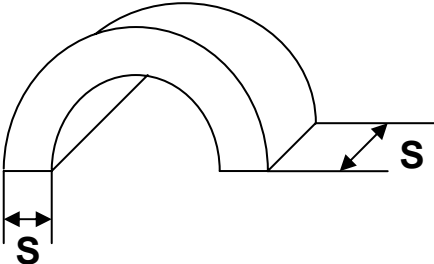
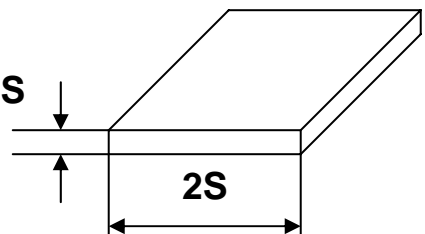
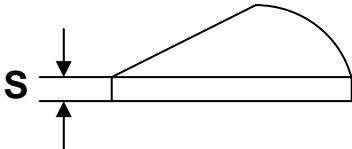
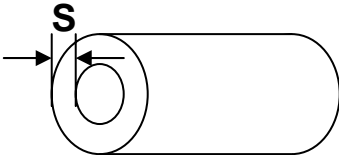
Forma de la pieza.	Coeficiente de forma k .
	0,7
	1,0
	1,5
	1,5

Tabla 2.9: Coeficientes de forma “k” para cálculo de tiempos de mantenimiento para diferentes piezas (continuación).

Forma de la pieza.	Coeficiente de forma k.
	2
	2 Tubos cortos y abiertos. 4 Tubos largos y cerrados por un lado.

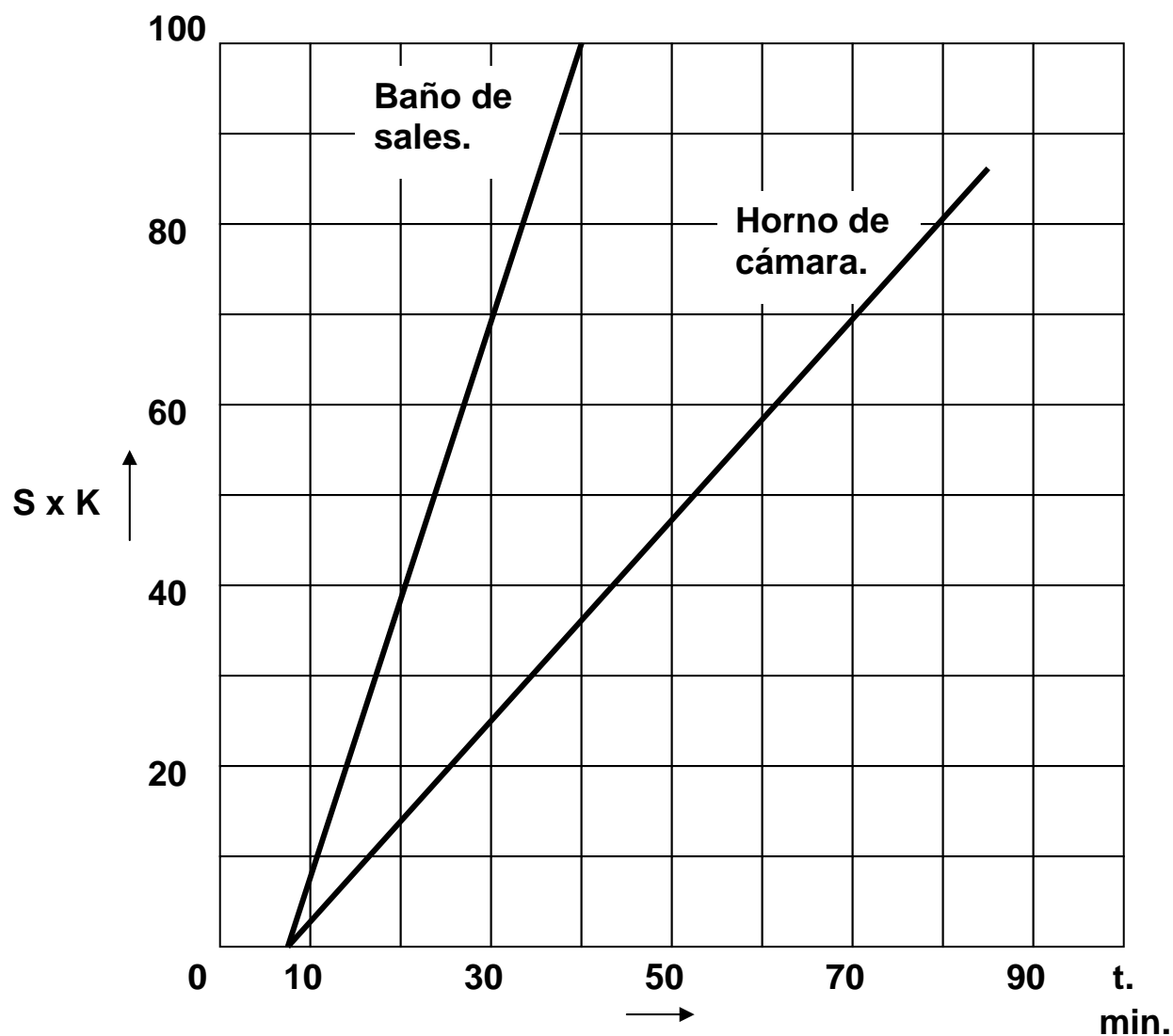


Figura 2.45: Duración del mantenimiento en el temple.

El método gráfico consiste en multiplicar el espesor “s” de la pieza por el coeficiente de forma “k” que aparecen en la tabla 2.9. Luego se procede a ver el tiempo de mantenimiento en el gráfico de la figura 2.45.

El tiempo se obtiene trazando una línea recta que parte del valor obtenido del producto mencionado (eje de las ordenadas $s \times k$), hasta intersectar la recta correspondiente al tipo de horno que se está usando, luego de este punto de intersección se traza otra línea recta que toque el eje de las abscisas (el eje del tiempo en este caso), el valor que toque esta línea recta, será el valor del tiempo que hay que mantener la pieza a la temperatura de temple.

Por ejemplo para un horno de cámara o mufla, si se tiene un $s \times k = 80$, el tiempo que se debe mantener la pieza a temperatura de temple será de 80 minutos (ver gráfico de la figura 2.45). Para el mismo valor de $s \times k$, en un horno de baño de sales requiere de un tiempo alrededor de 33 minutos.

Enfriamiento.

Es precisamente en esta etapa del temple donde está el secreto del proceso, pues la clave de este proceso está en la velocidad de enfriamiento de la pieza, es decir; para que la pieza se temple bien, la velocidad de enfriamiento de la misma, debe ser mayor que la velocidad crítica de temple, por velocidad crítica de temple se entiende que es la velocidad mínima de enfriamiento a la que se forma la estructura martensita en un 100%.

Etapas del enfriamiento.

El enfriamiento de piezas durante el temple se divide en tres etapas:

- . Contacto continuo con vapor.
- . Contacto intermitente con vapor y líquido.
- . Contacto continuo con líquido.

Contacto continuo con vapor: Cuando el acero es introducido en el medio líquido como su temperatura es muy alta se forma una capa de vapor que rodea al metal, en este caso el enfriamiento se hace por conducción y radiación a través de la capa gaseosa, el enfriamiento en el comienzo de esta fase es relativamente lento, influyendo en ello principalmente la temperatura de ebullición del líquido así como, la conductividad térmica del vapor.

Contacto intermitente con vapor y líquido: Cuando desciende la temperatura de la superficie del metal, la película de vapor va desapareciendo, sin embargo el líquido hierve todavía alrededor de las piezas y se forman muchas burbujas que rodean el acero.

Estas burbujas son transportadas principalmente por corrientes de convección, el vapor se va separando de la superficie de la pieza y va siendo reemplazado por líquido, esta etapa es de más rápido enfriamiento, el calor se elimina rápidamente como calor latente de vaporización, por esto esta etapa es llamada también enfriamiento por transporte de vapor.

Contacto continuo con líquido: esta etapa generalmente se da por debajo de 300 °C, el enfriamiento lo hace el líquido por conducción y convección, cuando la diferencia de temperatura, entre la superficie del metal y el medio refrigerante es pequeña. Esta etapa es más lenta que la anterior, por esto depende mucho de la conductividad del líquido y su agitación.

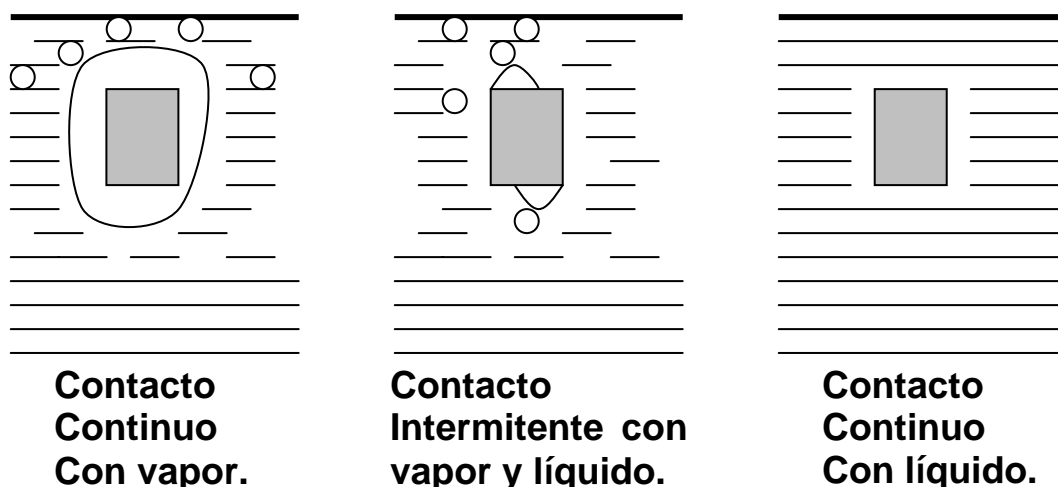


Figura 2.46: etapas del enfriamiento.

Medios de enfriamiento.

En todos los tratamientos térmicos, las piezas después de haber sido calentadas, se enfrían en medios que permitan darle al acero las propiedades finales deseadas, los medios más usados son, el mismo horno apagado, u otro especial para enfriamiento muy lento, sustancias en polvo tales como cenizas, arena u otro material refractario, baños de agua, aceites, sales o plomo fundido y el aire tranquilo o a presión. En general, se puede afirmar que el agua se usa para enfriar los aceros de bajo carbono y el aceite para los aceros aleados, el aire a presión o calmo, se utiliza para templar aceros de alta aleación. No obstante, para lo acabado de mencionar existen excepciones, por ejemplo; un acero para herramienta de 1,10% con un espesor menor a 3 mm, es conveniente templarla en aceite y ciertos aceros aleados con más de 10 mm de espesor, se templan en agua. De todos estos medios que ya mencionamos, serán los medios usados en este proyecto los que describiremos, que fueron los baños de agua, con y sin sal, y el aceite.

Baños de agua: Este medio se utiliza especialmente en el temple de aceros al carbono con un bajo contenido del mismo, los baños de agua deben mantenerse a una temperatura comprendida entre 15 y 26 °C, tampoco deben estar contaminado con jabón debido a que el mismo reduce el poder refrigerante del medio, para mejorar las propiedades refrigerantes de los baños de agua es recomendable agregar 10 % en peso (con respecto al agua) de sal común ó un 5% de sosa cáustica, la velocidad de enfriamiento del agua sin mezcla es alrededor de 0,72 °C / seg cuando dicho medio está a 25 °C, cuando se mezcla con sosa cáustica su velocidad se incrementa alrededor de 1,58 °C / seg y cuando se mezcla con sal su velocidad se incrementa aún más, alrededor de 1,96 °C / seg.

Baños de aceite: Cuando se quiere un enfriamiento con una velocidad intermedia, se emplea como medio refrigerante el aceite, que generalmente es usado para templar aceros aleados y aceros con alto contenido de carbono. Los baños de aceite deben reunir ciertas condiciones, tales como: no variar demasiado la viscosidad con los cambios de temperatura, poca volatilidad, buena resistencia a la oxidación y debe tener una temperatura de inflamación bastante alta.

Estas características se consiguen por destilación fraccionada del petróleo, los aceites empleados como medio de enfriamiento, deben tener en el momento de su uso, alrededor de 40 a 60 °C de temperatura para obtener los mejores resultados. En el caso de ciertos aceros aleados, el temple de estos aceros se puede realizar en aceite caliente, para estos casos el aceite se puede calentar hasta 95 °C.

Para los casos de talleres en donde se realizan temples de piezas en serie, los baños de aceite necesitan un sistema de enfriamiento que estabilice la temperatura del aceite, esto debido a que cuando se temple en serie. Las piezas templadas van calentando el aceite gradualmente, lo que es perjudicial para las piezas ya que el calentamiento del aceite reduce la velocidad de enfriamiento de las piezas, lo que a la final se traduce en una reducción en la dureza de las piezas, lo cual no es deseado en el proceso de temple. Las velocidades de enfriamiento de los medios de aceite andan alrededor de 0,22 a 0,30 °C / seg.

Velocidades de enfriamiento.

Las velocidades de enfriamiento varían de un acero a otro, siendo mayores para los aceros de bajo carbono y menores para los aceros aleados, los enfriamientos más rápidos se consiguen en agua y los más lentos en el horno, debido a la refractariedad de sus paredes que vuelven lenta la disipación de calor dentro del mismo, lo que hace que si una pieza se deje enfriando en su interior, se enfríe muy lentamente.

- **El proceso de revenido.**

Con el fin de endurecer el acero, es necesario templearlo para formarle martensita, pero esta estructura es demasiado frágil e inestable debido a que se trata de una estructura sobresaturada, por lo que esta no es apropiada para las aplicaciones de ingeniería; por esta razón el acero se somete al proceso de revenido, para conferirle ductilidad y tenacidad a costa de sacrificar la dureza del mismo. Este proceso tiene la característica de poder realizarse de manera tal que la selección de la temperatura sea en términos de la dureza que se desea conferir a la pieza, el comportamiento de las piezas de acero generalmente es que a mayor temperatura de revenido, menor dureza.

El proceso en si consiste en calentar de nuevo la martensita a una temperatura por debajo de A_1 , esto permite que la martensita inestable cambie a martensita revenida permitiendo que el carbono se precipite en forma de partículas muy finas de carburo. La resistencia o ductilidad deseadas se pueden controlar escogiendo apropiadamente los tiempos y temperatura de revenido. Generalmente el revenido se hace a temperaturas entre 150 y 650 ° C durante tiempos que van desde tiempos de 30 minutos a 4 horas, el efecto más importante del revenido en los aceros es el ablandamiento a medida que aumenta el tiempo y la temperatura de revenido. El ablandamiento de un acero por causa del revenido, se puede representar por curvas isócronas, mediante una gráfica de la dureza en función de la temperatura.

Por otra parte, la dureza puede ser representada en función del tiempo a una serie de temperaturas fijas (curvas isotérmicas) en donde el tiempo se encuentra en escala logarítmica. Finalmente, como el ablandamiento depende del tiempo y la temperatura simultáneamente, la forma más conveniente de representar el revenido es por líneas de isodureza en un diagrama de temperaturas en función del logaritmo del tiempo. A continuación se presenta en la figura 2.47. la curva (isócrona) de revenido del acero 4140.

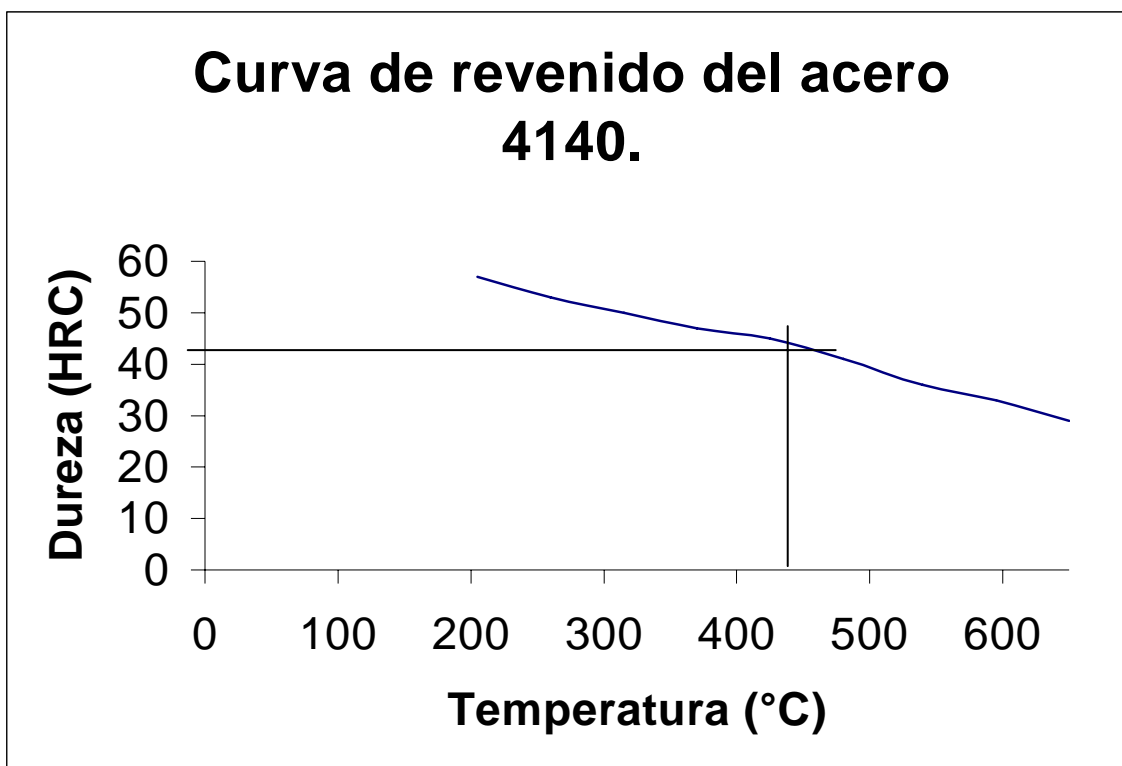


Figura 2.47: Curva de revenido del acero 4140.

Se puede construir esta curva para cada acero, esta; sirve específicamente para determinar la temperatura del proceso de revenido según la dureza que se desee darle al material. Por ejemplo, si se quiere darle al acero una dureza final de 45 Rockwell C, se traza una línea recta desde dicho valor de esta dureza, el gráfico de la figura 2.47, hasta intersectar la curva y luego desde esta intersección se traza otra línea recta hasta el eje de temperaturas y la temperatura que se ocupa para el proceso sería alrededor de 440 °C en este caso. La dureza que un acero puede obtener del revenido, se puede estimar mediante la siguiente fórmula denominada, fórmula de Hollomon y Jaffe, la cual es descrita mediante la siguiente ecuación:

$$H = T * [C + \log(t)]$$

H = Factor Hollomon Jaffe.

T = Temperatura en °K.

t = tiempo de revenido.

C = Constante (C = 20 si t es en horas y C = 16.5 si t en segundos).

Por ejemplo, se quiere estimar la dureza del acero 4140 si se aplica un revenido de 30 minutos a 315 °C, para este caso específico, la dureza debería ser:

$$H = T * [C + \log(t)]$$

$$H = (315 + 273) * [16.5 + \log(30 * 60)]$$

$$H = 588 * [16.5 + \log(1800)]$$

$$H = 588 * [16,5 + 3,25]$$

$$H = 588 * [19,75]$$

$$H = 11.616,1$$

Luego nos vamos a la curva de isodurezas del acero 4140 de la figura 2.48.

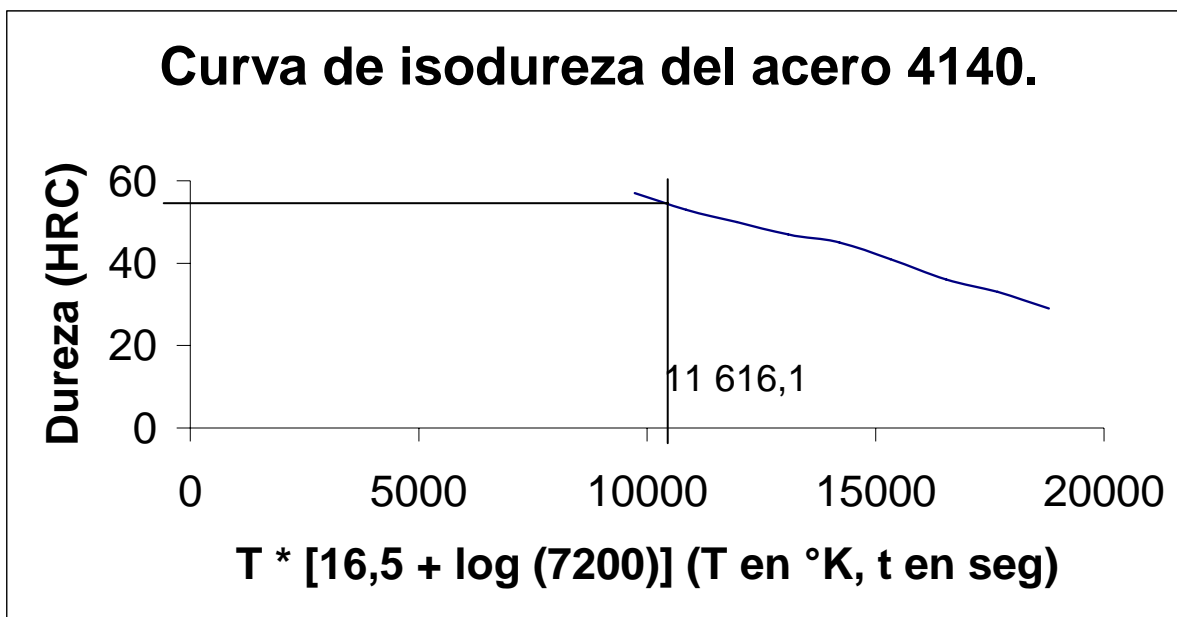


Figura 2.48: Curva de isodureza del acero 4140.

Buscamos el correspondiente valor H calculado, en el eje de las abscisas, trazamos una línea recta desde ese valor hasta intersectar la curva, luego trazamos otra línea recta desde la intersección con la curva hasta el eje de las ordenadas (dureza HRC) y se observa que el valor anda alrededor de 57 a 58, Rockwell C.

Por otro lado, el endurecimiento secundario del acero se refiere a la capacidad para retener la dureza a temperaturas de revenido altas, a las cuales los aceros corrientes se habrían ablandado considerablemente, en un comienzo se creyó que la austenita retenida se transformaba en martensita, pero después se descubrió que no era así.

En los aceros corrientes hay un ablandamiento progresivo, acompañado de un aumento de ductilidad y tenacidad, a medida que la austenita es revenida, entre 100 y 650 °C, la dureza a 100°C varía poco. En los aceros la formación del carburo entre 150 y 250 °C, produce una disminución de la dureza y la formación de una estructura que se conoce como Martensita negra, entre 300 y 400 °C, tanto en los acero de bajo como alto carbono, también producen una gran reducción de la dureza.

La posterior esferoidización de esos carburos, recuperación y recristalización a temperaturas aun mayores, disminuye aún más la dureza. Sin embargo si al acero se le añaden elementos formadores de carburo tales como Titanio, molibdeno, Vanadio, Tungsteno o tantalio, ocurre la reacción de endurecimiento secundario, entre 500 y 600 °C; como resultado de esa reacción se puede obtener una dureza similar a la de la condición templada. En el caso especial de los aceros rápidos el revenido se puede dividir en dos pasos.

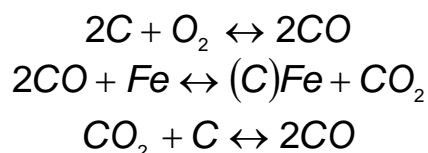
. La disminución de la dureza al aumentar la temperatura por descomposición de la martensita.

. El endurecimiento secundario debido a las partículas gruesas de cementita que se ven reemplazadas por una fina dispersión de carburos aleados como los carburos de titanio, vanadio, molibdeno y tungsteno.

- **El proceso de cementado.**

Este proceso pertenece a otra familia de procesos de procesos denominado, tratamientos termoquímicos o superficiales, estos consisten en sumergir la pieza a tratar en un medio enriquecido con un átomo en particular, el cual al calentarse difunde un tipo de átomo sobre la superficie de la pieza el cual genera un cambio en su composición química de formando una capa muy dura, la ventaja de estos procesos es que generan dureza superficial manteniendo un núcleo tenaz.

En general al proceso se le suele dar el nombre en términos del átomo que se difunde, por ejemplo, cuando el átomo difundido es carbono, al proceso se le llama carburización o cementado, cuando es nitrógeno al proceso se le llama nitruración, cuando es boro al proceso se le llama boratación, cuando es azufre se le llama sulfinización y así según el átomo que se difunde. Dentro todos estos tipos de procesos, el proceso que se implementó en este proyecto fue el de cementación sólida en caja. En la cementación en caja el agente o medio carburante es el monóxido de carbono generados por la por la reacción entre el carbón que rellena la caja con el aire atrapado en las partículas de polvo del relleno. Según la secuencia de las reacciones siguientes:



La presencia de activadores y catalizadores, tales como carbonato de Bario, o de sodio, aceleran las reacciones y se reconstituyen continuamente hasta concluir con todo el carbón presente.

El nombre de este proviene del hecho de que las piezas se colocan en cajas cerradas empacándolas con el componente carburante, se coloca una de 2 a 5 centímetros de espesor en el fondo de la caja, luego se colocan las piezas y, si es necesario, soportes y / o separadores, después se rellena la caja con el compuesto, se tapa y sella con arcilla refractaria. Bajo estas condiciones, la caja se introduce en el horno a temperaturas entre 810 y 950 °C, cuanto más altas es la temperatura más rápidamente se cementa el acero, y también son mayores los contenidos de carbono en la superficie de la capa resultante así como mayor es la profundidad de capa.

Sin embargo las temperaturas de cementación elevadas aumentan el tamaño de grano austenítico con el consiguiente deterioro de las propiedades mecánicas del material, por lo que se recomienda, cementar a 925 °C. Es evidente que la cementación en caja no permite el temple directo pero puede ser un buen método, eficiente y económico, para tratar lotes de piezas pequeñas que requieran de capas gruesas. Además puede ser conveniente cuando no se dispone de ningún otro equipo de cementación, su mayor desventaja es que es difícil obtener capas cementadas delgadas dentro de especificaciones estrechas, a veces es posible seguir el proceso por medio de clavos del mismo acero a tratar, que se introducen, luego de tapar la caja, a través de la parte superior y que se pueden quitar, templar y quebrar para determinar la profundidad de capa o se pueden usar para analizar el contenido de carbono en la superficie. El proceso de cementación se da en dos partes:

- . La disolución del carbono en la superficie.
- . La difusión hacia el interior de la pieza.

El carbono disuelto en la superficie del acero tendrá siempre una concentración aproximada a la de equilibrio con carbón puro a la temperatura de cementación. El carbono penetra por difusión atómica a través de un gradiente de concentración establecido entre la superficie y el núcleo. La teoría de difusión nos muestra que cuando un soluto difunde en el interior de un sólido a través de una superficie de concentración de soluto constante, la distancia “x” a partir de la superficie a la cual la concentración es la mitad de la concentración inicial del soluto y la concentración en la superficie, está dada por:

$$X = \sqrt{t * D}$$

Donde:

t = tiempo en segundos.

D = Difusividad del producto expresada en cm² / seg.

Por lo tanto es posible estimar la profundidad de capa en función del tiempo de cementación a cualquier temperatura, conociendo la difusividad del carbono en la austenita, esta está dada por:

$$D = D_0 * e^{\frac{-Q}{R*T}}$$

Donde:

R = Constante de los gases, 2 cal / mol °K

T = La temperatura del proceso en °K.

D₀ = Factor de frecuencia, 0,2 cm² / seg.

Q = Energía de activación, 32 000 cal / mol.

D₀ y Q varían con la concentración de carbono, pero en primera aproximación se pueden suponer las cantidades dadas en esta ecuación, cabe aclarar que esta ecuación solo es una estimación, no da un dato exacto. A continuación, se presenta la tabla 2.10.

Tabla 2.10: aplicaciones típicas de la carburación en caja.

Acero. SAE.	Capa a 50 HRC.	Temperatura de carburación. (°C).	Temperatura de temple. (°C)	Temperatura de revenido. (°C)
1020	3,0	925	790	150
1020	1,2	955	790	150
1022	1,8	940	790	205
1025	4,0	955	830	
1030	4,0	940		
1035	3,8	940		
2317	1,8	925		
2317	0,6	925		
2317	0,9	900		
2325	5,6	955		
3115	4,0	925		

Finalmente mostramos la forma en que se estima el espesor de capa de un proceso de cementado en caja el cual se lleva a 925 °C, durante cuatro horas. En este caso, calculamos el coeficiente de difusividad mediante la siguiente fórmula:

$$D = D_0 * e^{\frac{-Q}{R*T}} = (0,2 \text{ cm}^2 / \text{seg}) * e^{\frac{-32000 \text{ cal} / \text{mol}}{(2) \text{ cal} / \text{mol} \cdot ^\circ K * (925 + 273) ^\circ K}} = (0,2) * (1,59^{-6}) = 3,18^{-7} \text{ cm}^2 / \text{seg}$$

Con el coeficiente de difusividad, se encuentra el espesor de capa.

$$X = \sqrt{t * D} = \sqrt{(14.400) \text{ seg} * (3,18 * 10^{-6}) \text{ cm}^2 / \text{seg}} = \sqrt{4,58 * 10^{-3} \text{ cm}^2} = 0,06 \text{ cm}$$

Es conveniente expresar el espesor de capa en milímetros:

$$0,06 \text{ cm} * \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} = 0,6 \text{ mm}$$

Por lo tanto el espesor de capa para el proceso de cementado en caja descrito es 0,6 milímetros, cabe notar que este cálculo es sólo una estimación, no es exacto estrictamente hablando, sin embargo, en la práctica esta estimación es bastante aceptable.

Capítulo 3: Marco metodológico.

3.1. Introducción.

En este capítulo se expone la metodología con la que se trabajó en esta práctica, específicamente en la parte de caracterización de aceros e implementación del cementado en caja, las partes en que se compone el marco metodológico son:

- . Materiales y equipos utilizados.
- . Investigación de y solución problemas.
- . Procedimientos de caracterización de los aceros.
- . Resultados y observaciones de la caracterización de aceros.
- . Implementación del proceso de cementado.

Este capítulo es parte gruesa del trabajo realizado durante la práctica, se comienza mencionando la lista de materiales utilizados y se describe lo más importante de los aceros con los que se trabajó, se mostrarán unas tablas de equivalencia aproximada entre normas, la composición química y las características principales para tratamientos térmicos de estos aceros.

Luego se mencionan los equipos con los que se trabajó y se presentan unas tablas de conversión de dureza que nos serán útiles para la discusión de resultados, luego se mencionará sobre la investigación realizada sobre las causas que generan problemas en los procesos de temple y revenido, seguidamente; se hablará de los procedimientos de caracterización de los aceros estudiados, se mencionarán los procedimientos de temple, el de temple previo al revenido, el de revenido y finalmente el procedimiento de cementado. Por último se presentarán en tablas los resultados y observaciones de la caracterización de los aceros usados en el taller, esta caracterización tiene sus bases en dos objetivos, el primer objetivo es medir la precisión con la que trabaja el horno, el segundo objetivo es el de generar una base de datos de las características para tratamientos térmicos de los aceros del mercado nacional esto debido a que hay gran interés por parte de la empresa de tener esa información, la cual puede ser de mucha utilidad pues la misma genera ventajas de competitividad.

3.2. Materiales y equipos utilizados.

Esta sección se divide en dos partes, la primera parte lista los materiales utilizados y describe a detalle los aceros muestreados. La segunda parte, lista los equipos utilizados y describe sólo los detalles más importantes y necesarios de estos equipos para esta práctica.

Materiales.

La lista de materiales utilizados para esta práctica es la siguiente:

- . 1 disco de carburo de silicio y alúmina especial para corte de muestras
- . 5 galones de aceite soluble mezclado con agua (taladrina) para refrigerar durante el corte de muestras.
- . 100 gramos de resina (Bakelita roja) para montaje de probetas
- . 1 Lija 120 y 1 lija 450.
- . 1 Paño de billar.
- . Emulsión de aceite para pulido de muestras.
- . Pasta de diamante para pulido de muestras.
- . 100 ml de Nital al 5%.
- . 2 kilos de carbón vegetal.
- . 2 libras de bicarbonato de sodio.
- . 4 cajas tubulares de acero para cementación.
- . 4 libras Sal común o cloruro de sodio (NaCl).
- . Acero Cold Roll Steel 1018 (equivalente AISI / SAE 1018).
- . Acero calibrado 1022 (equivalente AISI / SAE 1022).
- . Acero St – 52 en barra perforada (equivalente AISI / SAE1024)
- . Acero F – 1140 (equivalente AISI / SAE1045).
- . Acero F – 1252 (equivalente AISI / SAE 4140).
- . Acero F – 1270 (equivalente AISI / SAE 4340).
- . Acero F – 5220 (equivalente AISI / SAE O1).
- . Acero Bohler k – 460 (equivalente AISI / SAE O1).
- . Acero Molders 1.2344 (equivalente AISI / SAE H13).
- . Acero Plata (equivalente AISI / SAE W1)

Descripción de los aceros caracterizados.

Tabla 3.1: Normas equivalentes aproximadas de los aceros caracterizados.

Acero.	UNE	DIN	AFNOR	ANSI	BS 4956	UNI	AISI SAE
Cold roll steel	F-15	CK-18	—	—	—	—	1018
1022.	F-15	CK-22	—	—	—	—	1022
St-52.	F-1515	20Mn5	E36-3	1.0580	Fe510D1F	Fe510CFN	1024
F-1140.	F-1140	CK-45	XC-45	1.1730	080M46	C-45	1045
F-1252.	F-1252	42CrMo4	42CD4	1.7225	708M40	42CrMo4	4140
F-1270.	F-1270	30NiCrMo7	—	—	—	35NiCrMo7	4340
F-5220.	F-5220	100MnCrW4	90MnWCV5	1.2510	—	—	O1
Bohler k - 460.	F-5220	100MnCrW4	90MnWCV5	1.2510	—	—	O1
Molders 1.2344	F-5318	X40CrMoV51	Z40CDV5	1.2324	BH13	X40CrMoV511KU	H13
Acero plata.	—	115CrV3	Y2 90	—	BW1A	115CrV3	W1

Tabla 3.2: Composición química aproximada de los aceros caracterizados.

Acero.	C. %	Mn. %	P. %	S. %	Si. %	Ni. %	Cr. %	Mo. %	V. %	W %
Cold roll steel.	0,18	0,75	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
1022.	0,22	0,85	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
St – 52.	0,24	1,50	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
F – 1140.	0,45	0,75	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
F – 1252.	0,41	0,75	—	—	0,25	—	1,00	0,20	—	—
F – 1270.	0,35	0,70	—	—	0,25	1,80	0,80	0,25	—	—
F – 5220.	0,95	1,10	—	—	0,25	—	0,50	—	0,10	0,50
Bohler k – 460.	0,95	1,10	—	—	0,25	—	0,50	—	0,12	0,55
Molders 1.2344	0,39	0,40	—	—	1,00	—	5,30	1,40	1,00	—
Acero plata.	1,18	—	—	—	—	—	0,7	—	0,1	—

Tabla 3.3: Características aproximadas de tratamientos térmicos de los aceros caracterizados según catálogos de fabricantes.

Acero.	Recocido (°C).	Temple (°C).	Medio Enfriante.	Dureza HRC.	Estado de suministro.
Cold Roll Steel.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Lámina y pletina. 111-149 HB
1022.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Barra sólida. 111-149 HB
St – 52.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Barra perforada. 146-210HB.
F – 1140.	670-710	830-860	Agua.	48-60	Estado bruto de laminación. Barra sólida. 180-228 HB.
F – 1252.	680-720	820-860	Aceite.	57-55	Estado recocido / bonificado Barra sólida. 174 – 232 / 223-340 HB.
F – 1270.	640-670	820-840	Aceite.	55-53	Estado recocido / bonificado. Barra sólida. 217 – 240 / 229-340 HB.
F – 5220.	750-780	780-840	Aceite.	60-62	Estado recocido globular. Barra sólida y pletina. 195-245 HB.
Bohler k – 460.	700-750	780-820	Aceite.	63-65	Estado recocido globular. Lámina y pletina. 198-248 HB.
Molders 1.2344.	760-820	1020-1050	Aceite caliente	53-38	Estado recocido globular. Barra sólida. 197-241 HB
Acero plata.	760-780	770-790	Agua.	63-66	Estado recocido globular. Barra sólida. 180-285 HB

Notas: Los datos de las tablas se tomaron de los catálogos de fabricantes de acero por lo que no necesariamente van a coincidir con los valores encontrados en los manuales de la ASM u otros.

El estado de suministro descrito en la tabla 3.3, es el que comúnmente se encuentra en el mercado nacional, el fabricante si se le solicita puede importar otros estados de suministro.

Descripción de equipos usados.

Los equipos usados para la investigación de problemas fueron se pueden catalogar de la siguiente forma:

- . Equipos para el análisis metalográfico.
- . Equipos para tratamientos térmicos.

Equipos para el análisis metalográfico.

El equipo para el análisis metalográfico usado en esta práctica fue el siguiente:

- . Una cortadora marca RAPIFLEX –1.
- . Una prensa de montaje de muestras marca METALOPRES – 1.
- . Una esmeriladora / pulidora marca MICROPOL – 1.
- . Un microscopio óptico marca ZUZI modelo 172.

Equipos de tratamientos térmicos.

El equipo para los tratamientos térmicos usados en esta práctica fue el siguiente:

- . Un horno de cámara con mufla Marca Hupert.
- . Un medidor de dureza marca HOYTOM modelo Duplex 713 SRD.
- . Un estanque con aceite especial para temple.
- . Un recipiente de plástico para almacenar agua.
- . Un recipiente para almacenar agua mezclada con sal común.

Nota: Los equipos y materiales usados se pueden apreciar en la sección B de fotos del apéndice.

Detalles importantes del medidor de dureza HOYTOM modelo DUPLEX 713 SRD.

Todas las mediciones de dureza con este equipo se realizaron en la escala Rockwell, de esta escala se midió en la escala Rockwell tipo C, los aceros tratados térmicamente, es decir; en estado bonificado (ver tabla 3.3) y los aceros cementados. Para los aceros en estado de suministro recocido globular, bruto de laminación (ver tabla 3.3) y recocido de ablandamiento, se midió en la escala Rockwell tipo B.

Una vez hechas las mediciones en los diferentes tipos de la escala Rockwell, se procedió a usar una tabla para hacer las respectivas conversiones de dureza a las escalas Brinell y Vickers, de las mediciones de dureza en la escala Rockwell B, se convirtieron a durezas Brinell todos los aceros que al inicio estaban en estado recocido globular, bruto de laminación (Cold roll steel, 1022, F – 5220, Molders 1.2344, y acero plata, ver tabla 3.3) y los aceros en estado inicial bonificado que se recocieron para ablandamiento previo al proceso de temple (aceros F – 1252 y F – 1270, ver tabla 3.3).

De las mediciones en la escala Rockwell C, se convirtieron a durezas Vickers solo los aceros que fueron cementados (Cold roll steel, 1022, St – 52, 1045, F – 1252 y F – 1270). A continuación, se presentarán las tablas de conversión de dureza del equipo marca HOYTOM modelo DUPLEX 713 SRD.

Tabla 3.4: Conversión de la escala Rockwell C a otros valores de dureza.

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.		Vickers
Escala C 150 kp diamante.	Escala A 60 kp diamante.	Escala D 100 kp diamante.	Escala 15-N 15 kp diamante superficial.	Escala 30-N 30 kp diamante superficial.	Escala 45-N 45 kp diamante superficial.	Bola 10 mm Standard 3000 kp	Bola 10 mm Carburo 3000 kp	
68	85,6	76,9	93,2	84,4	75,4			940
67	85,0	76,1	92,9	83,6	74,2			900
66	84,5	75,4	92,5	82,8	73,3			865
65	83,9	74,5	92,2	81,9	72,0		(739)	832
64	83,4	73,8	91,8	81,1	71,0		(722)	800
63	82,8	73,0	91,4	80,1	69,9		(705)	772
62	82,3	72,2	91,1	79,3	68,8		(688)	746
61	81,8	71,5	90,7	78,4	67,7		(670)	720
60	81,2	70,7	90,2	77,5	66,6		(654)	697
59	80,7	69,9	89,8	76,6	65,5		634	674
58	80,1	69,2	89,3	75,7	64,3		615	653
57	79,6	68,5	88,9	74,8	63,2		595	633
56	79,0	67,7	88,3	73,9	62,0		577	613
55	78,5	66,9	87,9	73,0	60,9		560	595
54	78,0	66,1	87,4	72,0	59,8		543	577
53	77,4	65,4	86,9	71,2	58,6		525	560
52	76,8	64,6	86,4	70,2	57,4	(500)	512	544
51	76,3	63,8	85,9	69,4	56,1	(487)	496	528
50	75,9	63,1	85,5	68,5	55,0	(475)	481	513

Tabla 3.4: Conversión de la escala Rockwell C a otros valores de dureza (continuación).

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.		Vickers
Escala C 150 kp diamante.	Escala A 60 kp diamante.	Escala D 100 kp diamante.	Escala 15-N 15 kp diamante superficial.	Escala 30-N 30 kp diamante superficial.	Escala 45-N 45 kp diamante superficial.	Bola 10 mm Standard 3000 kp	Bola 10 mm Carburo 3000 kp	
49	75,2	62,1	85,0	67,6	53,8	(464)	469	498
48	74,7	61,4	84,5	66,7	52,5	451	455	484
47	74,1	60,8	83,9	65,8	51,4	442	443	471
46	73,6	60,0	83,5	64,8	50,3	432	432	458
45	73,1	59,2	83,0	64,0	49,0	421	421	446
44	72,5	58,5	82,5	63,1	47,8	409	409	434
43	72,0	57,7	82,0	62,2	46,7	400	400	423
42	71,5	56,9	81,5	61,3	45,5	390	390	412
41	70,9	56,2	80,9	60,4	44,3	381	381	402
40	70,4	55,4	80,4	59,5	43,1	371	371	392
39	69,9	54,6	79,9	58,6	41,9	362	362	382
38	69,4	53,8	79,4	57,7	40,8	353	353	372
37	68,9	53,1	78,8	56,8	39,6	344	344	363
36	68,4	52,3	78,3	55,9	38,4	336	336	354
35	67,9	51,5	77,7	55,0	37,2	327	327	345
34	67,4	50,8	77,2	54,2	36,1	319	319	336
33	66,8	50,0	76,6	53,3	34,9	311	311	327
32	66,3	49,2	76,1	52,1	33,7	301	301	318
31	65,8	48,4	75,6	51,3	32,5	294	294	310

Tabla 3.4: Conversión de la escala Rockwell C a otros valores de dureza (continuación).

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.		Vickers
Escala C 150 kp diamante.	Escala A 60 kp diamante.	Escala D 100 kp diamante.	Escala 15-N 15 kp diamante superficial.	Escala 30-N 30 kp diamante superficial.	Escala 45-N 45 kp diamante superficial.	Bola 10 mm Standard 3000 kp	Bola 10 mm Carburo 3000 kp	
30	65,3	47,7	75,0	50,4	31,3	286	286	302
29	64,6	47,0	74,5	49,5	30,1	279	279	294
28	64,3	46,1	73,9	48,6	28,9	271	271	286
27	63,8	45,2	73,3	47,7	27,8	264	264	279
26	63,3	44,6	72,8	46,8	26,7	258	258	272
25	62,8	43,8	72,2	45,9	25,5	253	253	266
24	62,4	43,1	71,6	45,0	24,3	247	247	260
23	62,0	42,1	71,0	44,0	23,1	243	243	254
22	61,5	41,6	70,5	43,2	22,0	237	237	248
21	61,0	40,9	69,9	42,3	20,7	231	231	243
20	60,5	40,1	69,4	41,5	19,6	226	226	238

Observaciones: No existe un procedimiento general para establecer las conversiones entre los diferentes métodos de ensayo de dureza Rockwell, Brinell, Vickers, etc, o en valores de resistencia a la tracción. Las normas recomiendan evitar al máximo estas conversiones salvo en casos particulares en los que se haya comprobado su fiabilidad mediante ensayos comparativos.

Los valores de dureza Brinell indicados entre paréntesis exceden los límites establecidos para este ensayo en las normas.

Tabla 3.5: Conversión de la escala Rockwell B a otros valores de dureza.

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.	Vickers
Escala B 100 kp bola 1/16"	Escala A 60 kp diamante.	Escala F 60 kp bola 1/16"	Escala 15-T 15 kp bola 1/16"	Escala 30-T 30 kp bola 1/16"	Escala 45-T 45 kp bola 1/16"	Bola 10 mm Standard 3000 kp	
100	61,5		93,1	83,1	72,9	240	240
99	60,9		92,8	82,5	71,9	234	234
98	60,2		92,5	81,8	70,9	228	228
97	59,5		92,1	81,1	69,9	222	222
96	58,9		91,8	80,4	68,9	216	216
95	58,3		91,5	79,8	67,9	210	210
94	57,6		91,2	79,1	66,9	205	205
93	57,0		90,8	78,4	65,9	200	200
92	56,4		90,5	77,8	64,8	195	195
91	55,8		90,2	77,1	63,8	190	190
90	55,2		89,9	76,4	62,8	185	185
89	54,6		89,5	75,8	61,8	180	180
88	54,0		89,2	75,1	60,8	176	176
87	53,4		88,9	74,4	59,8	172	172
86	52,8		88,6	73,8	58,8	169	169
85	52,3		88,2	73,1	57,8	165	165
84	51,7		87,9	72,4	56,8	162	162
83	51,1		87,6	71,8	55,8	159	159
82	50,6		87,3	71,1	54,8	156	156

Tabla 3.5: Conversión de la escala Rockwell B a otros valores de dureza (continuación).

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.	Vickers
Escala B 100 kp bola 1/16"	Escala A 60 kp diamante.	Escala F 60 kp bola 1/16"	Escala 15-T 15 kp bola 1/16"	Escala 30-T 30 kp bola 1/16"	Escala 45-T 45 kp bola 1/16"	Bola 10 mm Standard 3000 kp	
81	50,0		86,9	70,4	53,8	153	153
80	49,5		86,6	69,7	52,8	150	150
79	48,9		86,3	69,1	51,8	147	147
78	48,4		86,0	68,4	50,8	144	144
77	47,9		85,6	67,7	49,8	141	141
76	47,3		85,3	67,1	48,8	139	139
75	46,8	99,6	85,0	66,4	47,8	137	137
74	46,3	99,1	84,7	65,7	46,8	135	135
73	45,8	98,5	84,3	65,1	45,8	132	132
72	45,3	98,0	84,0	64,4	44,8	130	130
71	44,8	97,4	83,7	63,7	43,8	127	127
70	44,3	96,8	83,4	63,1	42,8	125	125
69	43,8	96,2	83,0	62,4	41,8	123	123
68	43,3	95,6	82,7	61,7	40,8	121	121
67	42,8	95,1	82,4	61,0	39,8	119	119
66	42,3	94,5	82,1	60,4	38,7	117	117
65	41,8	93,9	81,8	59,7	37,7	116	116
64	41,4	93,4	81,4	59,0	36,7	114	114
63	40,9	92,8	81,1	58,4	35,7	112	112

Tabla 3.5: Conversión de la escala Rockwell B a otros valores de dureza (continuación).

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.	Vickers
Escala B 100 kp bola 1/16"	Escala A 60 kp diamante.	Escala F 60 kp bola 1/16"	Escala 15-T 15 kp bola 1/16"	Escala 30-T 30 kp bola 1/16"	Escala 45-T 45 kp bola 1/16"	Bola 10 mm Standard 3000 kp	
62	40,4	92,2	80,8	57,7	34,7	110	110
61	40,0	91,7	80,5	57,0	33,7	108	108
60	39,5	91,1	80,1	56,4	32,7	107	107
59	39,0	90,5	79,8	55,7	31,7	106	106
58	38,6	90,0	79,5	55,0	30,7	104	104
57	38,1	89,4	79,2	54,4	29,7	103	103
56	37,7	88,8	78,8	53,7	28,7	101	101
55	37,2	88,2	78,5	53,0	27,7	100	100
54	36,8	87,7	78,2	52,4	26,7		
53	36,3	87,1	77,9	51,7	25,7		
52	35,9	86,5	77,5	51,0	24,7		
51	35,5	86,0	77,2	50,3	23,7		
50	35,0	85,4	76,9	49,7	22,7		
49	34,6	84,8	76,6	49,0	21,7		
48	34,1	84,3	76,2	48,3	20,7		
47	33,7	83,7	75,9	47,7	19,7		
46	33,3	83,1	75,6	47,0	18,7		
45	32,9	82,6	75,3	46,3	17,7		
44	32,4	82,0	74,9	45,7	16,7		

Tabla 3.5: Conversión de la escala Rockwell B a otros valores de dureza (continuación).

Rockwell normal.			Rockwell superficial.			Brinell.	Vickers
Escala B 100 kp bola 1/16"	Escala A 60 kp diamante.	Escala F 60 kp bola 1/16"	Escala 15-T 15 kp bola 1/16"	Escala 30-T 30 kp bola 1/16"	Escala 45-T 45 kp bola 1/16"	Bola 10 mm Standard 3000 kp	
43	32,0	81,4	74,6	45,0	15,7		
42	31,6	80,8	74,3	44,3	14,7		
41	31,2	80,3	74,0	43,7	13,6		
40	30,7	79,7	73,6	43,0	12,6		
39	30,3	79,1	73,3	42,3	11,6		
38	29,9	78,6	73,0	41,6	10,6		
37	29,5	78,0	72,7	41,0	9,6		
36	29,1	77,4	72,3	40,3	8,6		
35	28,7	76,9	72,0	39,6	7,6		
34	28,2	76,3	71,7	39,0	6,6		
33	27,8	75,7	71,4	38,3	5,6		
32	27,4	75,2	71,0	37,6	4,6		
31	27,0	74,6	70,7	37,0	3,6		
30	26,6	74,0	70,4	36,3	2,6		

Para finalizar esta parte, solo queda explicar la razón del porque de la presentación de las tablas 3.1 a la 3.5, la razón principal es porque se necesitan citar dichas tablas en el capítulo 5 de discusión de resultados, la explicación de los resultados obtenidos en la caracterización de los aceros se fundamentan en estas tablas.

3.3. Procedimientos de caracterización de los aceros.

Procedimiento de recocido.

El procedimiento de recocido usado para esta práctica fue el siguiente:

1. Se recopilaron y se introdujeron las piezas de acero en estado bonificado F – 1252 y F – 1270 en el horno.
2. Se encendió el horno y se programó para que llegara a la temperatura de 150 °C.
3. Se procedió a someter los aceros un ciclo de precalentamiento que comenzó en 150 °C, luego se esperó 10 minutos y se elevó de nuevo a 300 °C, se esperó otros diez minutos y se volvió a elevar la temperatura a 450 °C, se esperó otros 10 minutos y finalmente se elevó a 600 °C se esperó otros 10 minutos y luego se procedió al siguiente paso.
4. Se elevó la temperatura a la de recocido de ambos aceros, en este caso se seleccionó una sola temperatura de recocido la cual fue la promedio para ambos materiales, es decir, 650 °C.
5. Una vez llegado a la temperatura de recocido seleccionada, se mantuvieron las piezas por dos horas en el horno.
6. Después de las dos horas se apagó el horno y se dejaron las piezas enfriando dentro del horno hasta el día siguiente.
7. Se limpiaron las piezas en el cepillo, se clasificaron y guardaron en bolsas y se llevan al sitio de medición de durezas.

8. Una vez en sitio de medición, se pulieron las superficies y se midieron las durezas de las muestras clasificadas y se anotaron en la tabla de resultados que fueron diseñadas para este proceso.

10. Se hicieron los respectivos cálculos de los datos anotados en la respectiva tabla de resultados.

11. Se realizó el respectivo análisis de resultados.

Nota: Este procedimiento se realizó dos veces, la primera vez fue antes de las pruebas del temple y luego se volvió realizar antes del temple previo al revenido.

Procedimiento de temple de aceros.

El procedimiento para el proceso de temple que se realizó para esta práctica fue el siguiente:

1. Se recopilaron muestras de cada acero, Cold Roll, 1022, ST – 52, F – 1140, F – 1252, F - 1270, Bohler K – 460, F – 5220, Molders 1.2344 y Acero Plata.

2. Se refrentaron en torno si las piezas son circulares o se rectificaron en cuando las piezas eran laminares.

3. Se cortaron las muestras en 12 pedazos pequeños.

4. Se procedió a someter los aceros al mismo ciclo de precalentamiento que en el recocido.

5. Se procedió a elevar a la temperatura de la cámara del horno hasta la crítica de temple, una vez que se alcanza dicha temperatura para cada acero, se metieron las correspondiente piezas al horno, debido a que la temperatura desciende al meter las piezas al horno, se esperó a que la temperatura regresara a la crítica de temple, una vez alcanzada la misma, se contaron 20 minutos y se procedió al siguiente paso.

6. Se templaron las piezas, para cada rango temperatura en agua, agua con sal y aceite para temple, los rangos se ven en la tabla 3.6.

7. Se limpiaron las piezas en el cepillo, se clasificaron y guardaron en bolsas y se llevaron al sitio de medición de durezas.

8. Una en sitio de medición, se pulieron las superficies y se midieron las durezas de las muestras clasificadas, se anotaron en la tabla de resultados que fueron diseñadas para este proceso.

9. Se hicieron los respectivos cálculos de los datos anotados en la respectiva tabla de resultados.

10. Se hicieron los gráficos de temperatura dureza para obtener la dureza óptima de temple para cada acero recolectado

11. Se realizó el respectivo análisis de resultados.

Tabla 3.6: Rangos de temperaturas seleccionados para los aceros templados.

Muestras.										
Temperatura. (°C)	Cold roll	1022	St 52	F 1140	F 1252	F 1270	BOHLER K - 460	F 5220	Molders 1.2344	Acero plata.
780							X	X		X
790										X
800				X			X	X		X
805						X				
810										X
815					X	X				
820				X			X	X		
830					X	X				
840				X			X	X		
845						X				
855					X					
860	X	X	X	X						
870					X					
880	X	X	X							
900	X	X	X							
920	X	X	X							

Tabla 3.6: Rangos de temperaturas seleccionados para los aceros templados (continuación).

Temperatura. (°C)	Muestras.									Acero plata.
	Cold roll	1022	St 52	F 1140	F 1252	F 1270	BOHLER K - 460	F 5220	Molders 1.2344	
1020									X	
1030									X	
1040									X	
1050									X	

Observaciones: Por cada marca con X de cada muestra, se deben temprar 3 muestras, una para enfriar en agua, la otra para enfriar en agua con sal y la otra en aceite para temple, por cada temperatura de temple se debe esperar 20 minutos antes de temprar una vez que se ha alcanzado la temperatura de temple con la pieza dentro del horno.

Procedimiento de temple previo al revenido de aceros.

El procedimiento para el proceso de temple previo al revenido que se realizó para esta práctica fue el siguiente:

1. Se recopilaron muestras de cada acero, Cold Roll, 1022, ST – 52, F – 1140, F – 1252, F - 1270, Bohler K – 460, F – 5220, Molders 1.2344 y Acero Plata.
2. Se refrentaron en torno si las piezas son circulares o se rectificaron cuando las piezas eran laminares.
3. Se cortaron las muestras en 12 pedazos pequeños.
4. Se metieron las piezas al horno.
5. Se procedió a someter los aceros al mismo ciclo de precalentamiento que en la prueba de temple anterior.
6. Se procedió a elevar a la temperatura de temple las piezas, una vez que se alcanzó la temperatura, se esperó 20 minutos y se procedió al siguiente paso.

7. Se templaron las piezas en el medio seleccionado, todas las piezas se templaron en aceite, sólo el acero F – 1140 se templó en agua con sal.

8. Se limpian las piezas en el cepillo, se clasifican y guardan en bolsas y se llevan al sitio de medición de durezas.

9. Una vez en sitio de medición, se pule las superficies y se miden las durezas de las muestras clasificadas y se anotaron en la tabla de resultados que fueron diseñadas para este proceso.

10. Haga los respectivos cálculos de los datos anotados en la respectiva tabla de resultados.

11. Haga los gráficos de temperatura dureza para obtener la dureza óptima de temple para cada acero recolectado

12. Realice el respectivo análisis de resultados.

Nota: Los rangos de temperatura seleccionadas para este proceso se pueden ver en la tabla 3.7 al final de este procedimiento.

Tabla 3.7: Rangos de temperaturas para temple de los aceros previo al proceso de revenido.

Temperatura. (°C)	F 1140	F 1252	F 1270	BOHLER K - 460	F 5220	Molders 1.2344	Acero plata.
795							X
810				X	X		
825			X				
830	X						
842		X					
980						X	

Observaciones: En este caso, se realizaron tres tandas de temple, la primera se realizó para el acero platas y el F – 1252, la segunda tanda se efectuaron para el Bohler K – 460, F – 5220 (tienen el mismo intervalo de temperatura de temple) y el F – 1140, la tercera etapa se le realizó a los aceros F – 1270 y al Molders 1.2344.

Estas combinaciones se realizaron de esta forma debido a que los intervalos de temperaturas de estos aceros no se cruzan entre si (ver tabla 3.6), eso evita que las piezas tengan un excedente de tiempo a la temperatura de austenización, lo que evita el crecimiento excesivo del tamaño de grano de los aceros previniendo así la alteración de los resultados. Las temperaturas seleccionadas en esta tabla corresponde la temperatura media del intervalo de temperaturas de temple dadas por el fabricante.

Procedimiento de revenido.

Luego del temple previo a este proceso, el procedimiento para el revenido que se realizó en esta práctica fue el siguiente:

1. Se encendió el horno a 50 °C por debajo de la temperatura mínima seleccionada de revenido, las temperaturas seleccionadas de revenido para cada acero recolectado esta ocasión son 150, 250, 350, 450, 550, 650 °C, para el acero Molders 1.2344 las temperaturas seleccionadas son 500, 550, 600 y 650.
2. Se metieron las piezas correspondientes al horno, dos muestras de cada acero recolectado, una para enfriar al aire calmo y la otra para enfriar en aceite sin agitación.
3. Se elevó a la temperatura seleccionada de revenido.
4. Una vez que el horno alcanza la temperatura seleccionada, se dejaron las piezas por dos horas.
5. Se sacaron las piezas y se dejaron enfriando al aire calmo una muestra y la otra en aceite sin agitación, esto se repite para cada tipo de acero recolectado.
6. Se repiten los pasos 1 a 5 para cada temperatura seleccionada en orden ascendente, desde 150 hasta 650 °C para todos los aceros menos el Molders 1.2344, el cual tiene un revenido desde 500 a 650 °C.
8. Una vez enfriadas las piezas se clasificaron y guardaron en bolsas las piezas para trasladarlas al sitio de medición.

9. Una vez en dicho sitio, procedió a pulir las muestras y a medir la dureza de cada pieza, se anotó en una tabla la dureza con su correspondiente temperatura de revenido.

10. Se hicieron los respectivos cálculos de los datos anotados en la respectiva tabla de resultados.

11. Se hicieron los gráficos de temperatura dureza para obtener las curvas de revenido para cada acero recolectado.

12. Se realizó el respectivo análisis de resultados.

Nota: El orden y los rangos de temperatura para el procedimiento de revenido se pueden ver en la tabla 3.8 al final de este procedimiento.

Tabla 3.8: Rangos de temperatura de revenido de los aceros caracterizados.

Temperatura. (°C)	Muestras.						Acero plata.
	F 1140	F 1252	F 1270	Bohler K – 460.	F 5220	Molders 1.2344	
150	X	X	X	X	X		X
250	X	X	X	X	X		X
350	X	X	X	X	X		X
450	X	X	X	X	X		X
500						X	
550	X	X	X	X	X	X	X
600						X	
650	X	X	X	X	X	X	X

Observaciones: Por cada marca con X de cada muestra, se deben revenir 2 muestras, una para enfriar en aire calmo y la otra en aceite sin agitación, por cada temperatura seleccionada de revenido se debe esperar 2 horas antes de enfriar.

3.4. Resultados y observaciones de la caracterización.

Los resultados de dureza obtenidos para esta parte de la práctica fueron los siguientes:

Tabla 3.9: Dureza de aceros en estado de suministro.

Acero.	Dureza HRB.	Dureza HRC.	Dureza HB.
Cold Roll Steel.	77,00	—	144,0
1022.	81,00	—	153,0
St – 52.	93,10	—	200,5
F – 1140.	90,80	—	189,0
F – 1252.	—	25,6	256,0
F – 1270.	—	27,3	266,1
F – 5220.	86,60	—	170,8
Bohler k – 460.	93,20	—	201,0
Molders 1.2344.	70,90	—	126,8
Acero plata.	92,40	—	197,0

Tabla 3.10: Dureza de aceros bonificados que fueron recocidos.

Acero.	Dureza (HRB).	Dureza (HB).
F – 1252.	88,8	179,2
F – 1270.	90,5	237,5

Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple en tres medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas.

			Medidas de dureza. (HRC).					
Muestra.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	1	2	3	4	5	Promedio.
Cold Roll Steel.	860	Agua.	50,4	55,4	56,3	56,8	55,4	54,86
	860	Agua con sal.	57,2	56,8	58,2	59,8	58,5	58,10
	860	Aceite.	50,9	54,5	54,0	55,3	54,3	53,80
	880	Agua.	56,1	54,5	51,3	54,9	55,7	54,50
	880	Agua con sal.	55,3	54,4	55,1	57,0	56,5	55,66
	880	Aceite.	53,5	53,6	54,7	53,8	52,6	53,64
	900	Agua.	54,1	51,9	51,3	49,1	46,6	50,60
	900	Agua con sal.	50,1	51,1	51,8	52,0	50,0	51,00
	900	Aceite.	46,3	44,7	47,5	46,5	47,1	46,42
	920	Agua.	35,2	30,1	28,1	24,6	32,6	30,12
1022.	920	Agua con sal.	37,2	36,6	37,9	36,1	35,7	36,70
	920	Aceite.	5,2	5,6	6,6	6,4	6,1	05,98
	860	Agua.	28,1	24,0	27,4	29,5	29,3	27,66
	860	Agua con sal.	42,4	41,8	41,9	41,2	43,2	42,10
	860	Aceite.	5,2	5,6	5,1	5,1	5,0	5,20
	880	Agua.	39,5	38,8	39,6	40,5	39,0	39,84
	880	Agua con sal.	39,6	39,6	39,9	40,5	40,8	40,08
	880	Aceite.	17,2	18,5	17,7	14,2	17,2	14,96
	900	Agua.	31,0	28,6	14,7	26,2	27,7	25,64
	900	Agua con sal.	22,1	34,6	33,4	35,9	30,5	31,3
	900	Aceite.	8,7	8,2	7,2	6,5	9,8	8,08
	920	Agua.	35,2	32,3	30,1	28,1	14,6	28,06
	920	Agua con sal.	37,2	36,6	37,9	36,1	35,7	36,58
	920	Aceite.	5,2	5,6	6,6	6,4	4,1	05,58

Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple en tres medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Acero.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
St – 52.	860	Agua.	40,6	40,2	40,5	41,6	40,8	40,74
	860	Agua con sal.	43,7	41,6	44,6	44,1	44,9	43,78
	860	Aceite.	31,4	33,0	31,8	33,3	35,5	33,00
	880	Agua.	42,7	45,9	44,5	46,1	46,2	45,08
	880	Agua con sal.	42,8	44,0	46,1	46,1	46,7	45,14
	880	Aceite.	41,3	40,7	40,8	39,6	40,1	40,50
	900	Agua.	41,9	44,0	44,6	44,4	45,4	44,06
	900	Agua con sal.	46,2	43,1	44,5	44,9	45,2	44,78
	900	Aceite.	34,2	31,4	37,2	36,1	38,5	35,48
	920	Agua.	40,8	44,5	43,4	43,4	45,7	43,56
	920	Agua con sal.	43,2	43,9	43,5	44,0	43,9	43,70
	920	Aceite.	40,7	41,8	40,1	40,4	41,7	40,94
F – 1140.	800	Agua.	60,8	60,7	60,6	60,9	6,2	60,64
	800	Agua con sal.	62,6	61,2	61,3	62,3	61,5	61,78
	800	Aceite.	58,9	59,2	59,1	59,3	59,2	59,14
	820	Agua.	60,0	61,2	60,9	60,6	60,3	60,60
	820	Agua con sal.	60,0	61,6	61,8	61,4	61,5	61,26
	820	Aceite.	55,7	57,9	57,7	58,2	57,0	57,30
	840	Agua.	60,3	61,0	59,1	60,7	61,5	60,52
	840	Agua con sal.	59,8	60,0	60,5	61,6	60,8	60,54
	840	Aceite.	55,8	58,4	59,1	58,7	59,0	58,20
	860	Agua.	59,1	58,9	60,2	61,9	59,2	59,86
	860	Agua con sal.	59,2	60,0	60,3	62,2	61,6	60,66
	860	Aceite.	50,8	52,0	52,9	53,5	53,4	52,52

Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple en tres medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Acero.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
F – 1252.	815	Agua.	60,4	60,5	59,6	59,8	60,3	60,12
	815	Agua con sal.	59,9	60,1	60,5	60,6	60,5	60,32
	815	Aceite.	54,4	56,7	57,3	57,4	56,2	56,40
	830	Agua.	53,2	56,3	55,5	56,1	57,2	55,66
	830	Agua con sal.	56,1	57,8	57,5	58,2	59,5	57,82
	830	Aceite.	55,8	53,7	54,4	53,5	55,0	54,48
	855	Agua.	56,9	58,6	57,8	56,8	56,7	57,36
	855	Agua con sal.	58,7	59,3	59,7	59,1	59,6	59,28
	855	Aceite.	53,1	52,3	52,6	52,6	52,3	52,58
	870	Agua.	54,2	54,7	54,5	54,0	53,9	54,26
	870	Agua con sal.	53,9	57,2	53,6	59,4	58,1	56,44
	870	Aceite.	52,9	52,8	53,4	53,8	54,6	53,50
F – 1270.	805	Agua.	58,1	57,8	59,0	59,1	57,9	58,38
	805	Agua con sal.	59,7	60,0	60,4	60,3	59,8	60,04
	805	Aceite.	55,5	57,0	56,9	56,6	56,5	56,50
	815	Agua.	59,7	58,9	60,0	58,3	58,5	59,08
	815	Agua con sal.	59,0	59,4	59,0	58,5	58,8	58,94
	815	Aceite.	55,4	56,2	57,1	57,2	57,6	56,70
	830	Agua.	57,4	56,5	55,6	58,1	57,3	56,98
	830	Agua con sal.	58,9	58,4	59,5	58,9	58,6	58,86
	830	Aceite.	54,5	52,5	55,9	54,7	52,3	53,98
	845	Agua.	57,7	58,4	57,8	57,7	57,6	57,84
	845	Agua con sal.	57,9	59,2	57,7	58,1	59,1	58,40
	845	Aceite.	56,1	56,0	56,5	56,2	56,4	56,24

Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple en tres medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Acero.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
F – 5220.	780	Agua.	55,7	56,8	58,7	58,4	54,6	56,84
	780	Agua con sal.	57,0	58,7	58,1	58,9	59,3	58,40
	780	Aceite.	61,5	61,9	62,1	63,8	62,3	62,32
	800	Agua.	65,1	62,4	66,8	66,1	63,1	64,70
	800	Agua con sal.	64,6	65,7	65,1	65,5	64,8	65,14
	800	Aceite.	62,9	62,1	62,7	62,3	63,8	62,76
	820	Agua.	57,8	58,8	58,1	58,5	58,2	58,28
	820	Agua con sal.	58,0	60,2	60,3	59,3	59,6	59,48
	820	Aceite.	62,0	62,7	62,6	62,1	61,5	62,18
	840	Agua.	56,2	57,3	59,5	58,3	57,9	57,84
	840	Agua con sal.	58,1	55,5	57,7	57,7	58,0	57,40
	840	Aceite.	62,3	61,9	61,8	62,1	63,4	62,30
Bohler. K – 460.	780	Agua.	57,6	58,4	57,7	54,9	54,6	56,64
	780	Agua con sal.	63,4	64,1	64,5	60,8	63,4	63,24
	780	Aceite.	63,1	63,2	60,0	64,1	61,5	63,18
	800	Agua.	62,8	65,2	64,3	63,8	64,5	64,12
	800	Agua con sal.	60,0	61,5	61,9	61,3	62,5	61,44
	800	Aceite.	64,3	63,4	63,5	63,8	62,9	63,58
	820	Agua.	59,1	60,7	57,9	59,5	60,3	59,50
	820	Agua con sal.	58,0	60,2	60,3	59,3	59,6	59,48
	820	Aceite.	62,6	64,0	62,7	63,1	63,2	63,12
	840	Agua.	56,2	57,3	59,5	58,3	57,9	57,84

Tabla 3.11: Dureza de pruebas de temple en tres medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Acero.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
Molders 1.2344.	1020	Agua.	39,4	41,1	42,1	44,6	42,5	41,94
	1020	Agua con sal.	41,4	43,1	44,1	44,8	44,4	43,56
	1020	Aceite.	49,5	51,4	50,7	51,0	50,1	50,54
	1030	Agua.	39,1	40,8	41,4	40,8	40,5	40,52
	1030	Agua con sal.	37,3	41,2	40,5	40,0	41,4	40,08
	1030	Aceite.	42,2	43,0	42,7	41,7	41,3	42,18
	1040	Agua.	39,2	37,6	39,1	40,6	39,6	39,22
	1040	Agua con sal.	38,9	38,2	39,8	38,7	39,4	39,00
	1040	Aceite.	42,9	40,4	42,6	42,7	42,0	42,12
	1050	Agua.	37,2	37,6	38,3	38,7	38,2	38,00
	1050	Agua con sal.	38,2	38,0	37,6	37,5	38,3	37,92
	1050	Aceite.	41,8	41,1	41,5	41,9	43,8	42,02
Acero Plata.	780	Agua.	66,4	66,7	66,8	66,5	66,4	66,56
	780	Agua con sal.	65,9	65,7	65,8	65,2	66,0	65,72
	780	Aceite.	65,1	65,4	65,5	64,5	65,0	65,10
	790	Agua.	66,2	66,0	66,3	66,4	66,5	66,28
	790	Agua con sal.	66,1	66,4	66,3	66,2	66,0	66,20
	790	Aceite.	65,9	66,4	66,5	66,2	66,5	66,30
	800	Agua	65,8	66,1	66,2	66,7	66,9	66,34
	800	Agua con sal.	65,5	65,9	64,5	66,3	64,5	65,34
	800	Aceite	63,7	62,5	64,3	63,9	64,9	63,86
	810	Agua.	66,1	66,4	67,4	67,3	66,8	66,80
	810	Agua con sal.	67,2	66,5	66,3	66,7	66,4	66,62
	810	Aceite.	64,1	66,1	66,4	66,3	66,2	65,82

Observaciones: Algunos aceros presentaron agrietamientos en el temple con agua y agua con sal, estos aceros son el Bohler K – 460, F – 5220. En el caso de los aceros F – 1140, F – 1252 y el acero plata se presentaron grietas no esperadas, las causas del porque se agrietaron estas piezas, se explican en el capítulo 5 de discusión de resultados. En ningún caso se presentaron grietas para los temples en aceite.

Tabla 3.12: Dureza de pruebas de temple previo al revenido de diferentes aceros a distintas temperaturas.

			Medidas de dureza. (HRC).					
Acero.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	1	2	3	4	5	Promedio.
F – 1140.	830	Agua con sal.	59,3	60,1	58,9	61,0	59,5	58,68
F – 1252.	842	Aceite.	54,6	56,2	58,3	57,7	57,0	56,76
F – 1270.	825	Aceite.	55,3	54,8	54,7	55,0	55,4	55,04
F – 5220.	810	Aceite	60,4	60,7	60,3	61,8	60,5	60,74
Bohler K– 460.	810	Aceite.	59,7	62,9	61,9	62,8	63,7	62,20
Molders 1.2344.	1000	Aceite caliente.	47,7	46,9	45,8	47,8	47,2	47,08
Acero Plata.	795	Aceite.	64,3	63,9	64,7	64,1	63,5	64,10

Tabla 3.13: Durezas del revenido en dos medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas.

			Medidas de dureza. (HRC).					
Muestra.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	1	2	3	4	5	Promedio.
F – 1140.	150	Aire calmo.	55,1	55,7	55,8	53,7	56,2	54,80
	250	Aire calmo.	50,7	51,3	51,2	49,9	50,5	50,72
	350	Aire calmo.	43,2	44,8	44,7	45,1	44,9	44,54
	450	Aire calmo.	37,4	38,4	37,3	37,2	38,0	37,66
	550	Aire calmo.	34,0	33,8	33,4	34,3	34,4	33,98
	650	Aire calmo.	15,5	16,6	16,1	15,8	15,2	15,84
	150	Aceite sin agitar.	55,1	54,9	54,5	55,4	55,0	54,98
	250	Aceite sin agitar.	52,8	52,2	52,4	51,9	52,0	52,26
	350	Aceite sin agitar.	43,2	45,7	44,6	45,1	45,1	44,74
	450	Aceite sin agitar.	37,8	37,9	38,0	39,2	37,9	38,16
	550	Aceite sin agitar.	34,0	35,8	34,2	35,3	34,1	34,68
	650	Aceite sin agitar.	17,5	18,1	19,1	18,1	19,2	18,40

Tabla 3.13: Durezas del revenido en dos medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Muestra.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
F – 1252.	150	Aire calmo.	54,8	54,9	55,1	54,8	53,5	54,62
	250	Aire calmo.	50,8	51,3	50,8	51,2	50,9	51,00
	350	Aire calmo.	44,3	45,6	45,5	44,6	44,7	44,94
	450	Aire calmo.	42,5	42,9	43,1	43,1	42,7	42,86
	550	Aire calmo.	35,2	36,6	35,7	37,3	35,7	36,10
	650	Aire calmo.	23,9	24,2	24,2	23,8	24,4	24,10
	150	Aceite sin agitar.	53,5	53,5	53,9	54,0	53,8	53,74
	250	Aceite sin agitar.	51,3	51,1	50,8	51,6	51,2	51,20
	350	Aceite sin agitar.	46,9	46,8	46,9	46,5	47,0	46,82
	450	Aceite sin agitar.	38,1	38,4	37,2	37,4	38,9	38,00
	550	Aceite sin agitar.	35,7	36,9	35,8	36,9	36,1	36,28
	650	Aceite sin agitar.	23,9	24,4	24,6	24,4	24,9	24,44
F – 1270.	150	Aire calmo.	51,5	52,6	51,2	52,4	52,1	51,96
	250	Aire calmo.	50,2	50,4	50,5	50,2	50,3	50,32
	350	Aire calmo.	43,8	44,0	44,3	44,3	43,8	44,04
	450	Aire calmo.	43,7	43,2	43,5	43,1	43,6	43,42
	550	Aire calmo.	36,0	35,7	36,0	35,8	35,9	35,88
	650	Aire calmo.	28,4	28,2	29,6	28,7	28,4	28,72
	150	Aceite sin agitar.	51,2	52,8	52,2	52,2	51,9	52,06
	250	Aceite sin agitar.	50,8	50,4	50,2	50,6	50,1	50,42
	350	Aceite sin agitar.	44,9	45,0	44,6	44,7	45,1	44,86
	450	Aceite sin agitar.	42,8	43,7	44,1	44,4	44,3	43,86
	550	Aceite sin agitar.	36,0	35,6	35,4	34,7	36,1	36,56
	650	Aceite sin agitar.	26,1	27,0	26,7	26,5	26,6	26,58

Tabla 3.13: Durezas del revenido en dos medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Muestra.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
F – 5220.	150	Aire calmo.	60,3	60,2	60,2	60,4	60,3	60,28
	250	Aire calmo.	60,1	60,0	60,1	60,3	60,5	60,20
	350	Aire calmo.	50,8	52,4	51,8	51,7	50,6	51,46
	450	Aire calmo.	46,0	47,2	46,4	47,9	47,1	46,92
	550	Aire calmo.	39,6	41,5	41,9	39,0	41,7	40,74
	650	Aire calmo.	26,3	26,4	26,8	26,6	26,1	26,44
	150	Aceite sin agitar.	60,1	61,2	61,2	60,6	60,7	60,76
	250	Aceite sin agitar.	57,9	59,0	59,2	58,1	58,3	58,50
	350	Aceite sin agitar.	51,7	51,6	51,6	51,3	51,5	51,54
	450	Aceite sin agitar.	47,1	46,0	47,9	47,4	47,7	47,22
	550	Aceite sin agitar.	40,9	41,6	41,0	40,9	40,3	40,94
	650	Aceite sin agitar.	30,9	32,8	31,8	31,6	29,4	31,30
Bohler K - 460	150	Aire calmo.	58,8	57,9	59,2	59,3	58,8	58,80
	250	Aire calmo.	58,2	58,1	58,9	58,7	59,2	58,62
	350	Aire calmo.	51,9	52,0	50,1	51,0	50,4	51,08
	450	Aire calmo.	46,8	48,2	47,1	47,4	47,7	47,44
	550	Aire calmo.	39,1	38,1	37,1	38,7	38,4	38,28
	650	Aire calmo.	28,4	29,0	28,0	27,7	28,2	28,26
	150	Aceite sin agitar.	57,9	58,0	57,2	57,0	57,9	57,60
	250	Aceite sin agitar.	56,1	57,2	56,2	57,4	57,4	56,86
	350	Aceite sin agitar.	48,7	49,1	48,0	48,9	48,8	48,70
	450	Aceite sin agitar.	47,6	46,4	47,2	47,3	47,2	47,14
	550	Aceite sin agitar.	37,6	38,1	36,9	36,6	33,6	36,56
	650	Aceite sin agitar.	26,0	26,2	26,8	26,4	26,0	26,28

Tabla 3.13: Durezas del revenido en dos medios, de diferentes aceros a distintas temperaturas (continuación).

Muestra.	Temperatura. (°C)	Medio de enfriamiento.	Medidas de dureza. (HRC).					Promedio.
			1	2	3	4	5	
Molders 1.2344.	500	Aire calmo.	44,5	46,1	46,9	46,2	47,8	46,30
	550	Aire calmo.	44,5	44,5	44,6	45,2	44,3	44,62
	600	Aire calmo.	37,3	39,2	39,0	39,2	38,4	38,62
	650	Aire calmo.	23,4	26,3	26,3	25,8	26,1	25,58
	500	Aceite sin agitar.	45,7	46,2	46,2	47,3	46,5	46,38
	550	Aceite sin agitar.	46,1	44,7	44,6	45,8	45,3	45,30
	600	Aceite sin agitar.	39,0	39,3	38,0	39,8	40,2	39,26
	650	Aceite sin agitar.	25,1	26,3	27,3	26,9	27,0	26,52
Acero Plata.	150	Aire calmo.	59,6	60,4	60,5	59,9	60,4	60,16
	250	Aire calmo.	57,0	56,5	57,4	58,4	57,8	57,42
	350	Aire calmo.	50,0	49,7	49,8	50,3	49,9	49,94
	450	Aire calmo.	39,5	38,1	41,0	39,8	40,2	39,72
	550	Aire calmo.	30,4	32,5	32,1	32,6	33,0	32,12
	650	Aire calmo.	18,4	18,0	18,4	19,2	18,9	18,58
	150	Aceite sin agitar.	59,8	59,8	60,6	59,9	59,4	59,90
	250	Aceite sin agitar.	55,8	56,3	55,9	56,3	56,6	56,18
	350	Aceite sin agitar.	48,3	49,5	49,2	48,8	48,6	48,88
	450	Aceite sin agitar.	45,9	47,0	47,3	46,2	46,8	46,64
	550	Aceite sin agitar.	31,3	31,4	31,9	32,3	33,5	32,08
	650	Aceite sin agitar.	25,1	27,2	26,7	26,5	25,5	26,20

3.5. Implementación del proceso de cementado en caja.

Entre los trabajos realizados en esta práctica también se encuentra la implementación del proceso de cementación sólida o en caja, en esta parte, lo que corresponde es establecer por escrito el procedimiento de ejecución del proceso, este mismo puede leerse en el manual que se redactó para la empresa. También se hicieron pruebas sobre algunos aceros que se usan en el mercado nacional, los aceros ensayados son el Cold roll steel, 1022, St – 52, F – 1140, F – 1252 y el F – 1270, los demás aceros no se considero necesario su ensayo debido a sus aplicaciones industriales, aunque pueden también ensayarse por este proceso.

Con respecto a los catalizadores de la reacción de difusión del carbón, se encuentran en el mercado dos tipos, el carbonato de calcio y el bicarbonato de sodio, de los cuales es más escaso el primero, de hecho en esta temporada del año no se logró conseguir este catalizador por lo que las pruebas se hicieron sólo con bicarbonato de sodio el cual dio buenos resultados. En el manual también aparece una tabla que muestra la estimación del espesor de capa en función del tiempo, esta tabla es de mucha utilidad si se quiere saber que espesor de capa se logra generar si cementa durante un determinado tiempo.

El procedimiento usado en las pruebas de esta práctica fue el siguiente:

- **Preparación de la mezcla.**

1. Se puso en un recipiente, el 30% de la masa en peso de la caja tubular de cementado en bicarbonato de sodio.
2. Se puso sobre el mismo recipiente, el 70% de la masa en peso de la caja de cementado en carbón.
3. Se mezcló en las proporciones descritas, el carbón con el bicarbonato de sodio hasta formar una sola masa uniforme.

- **Cementación en caja.**

1. Se prepararon 4 cajas tubulares y se colocó una capa de aproximadamente un centímetro sobre el suelo de la caja.
2. Se colocaron las piezas separadas entre si de forma tal que las mismas al enterrarse, quedaron separas por una capa de la mezcla.
3. Se enterraron las piezas con la mezcla hasta llenar por completo la caja.
4. Se puso una tapa en la parte superior de la caja.
5. Se selló la tapa con barro mezclado con agua de manera que la mezcla formó una capa de lodo espeso.
6. Se metieron las 4 cajas al horno.
7. Se procedió a someter los aceros al ciclo de precalentamiento comúnmente usado en esta práctica
8. Una vez llegado a la temperatura de cementación, se esperó un tiempo seleccionado para sacar las cajas, los tiempos seleccionados fueron 1, 2, 4 y 6 horas.
9. Pasado el tiempo seleccionado se sacaron respectivamente las cajas y se colocaron sobre una mesa, se quitó la tapa y se sacaron las piezas las cuales se templaron en aceite.
10. Se limpian las piezas en el cepillo, se clasifican y guardan en bolsas y se llevan al sitio de medición de durezas.
11. Una vez en sitio de medición, se cortaron en la sección transversal cada pieza, luego se pule dichas superficies y se miden las durezas de las muestras clasificadas, la medición comienza en la superficie y se avanza hasta llegar al núcleo de la pieza, se anotaron los resultados en la tabla que fue diseñada para este proceso.
12. Se hicieron los gráficos de distancia de la superficie al núcleo – dureza para verificar el comportamiento esperado.

13. Se realizó el respectivo análisis de resultados.

Para finalizar este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de cementado en caja, estos se muestran en la tabla 3.14 que a continuación se presenta.

Tabla 3.14: Resultados de dureza de las pruebas de cementado en caja.

Acero.	Dist. total.	S	d1	d2	N	Dureza en superficie.		Dureza a d1.		Dureza a d2.			Dureza en el núcleo.		
	mm	mm	mm	mm	mm	HRC	HV	HRC	HV	HRB	HRC	HV	HRB	HRC	HV
Cold roll.	15,0	0	3,5	5,5	7,5	58,6	665,6	26,2	276,4	82,6	–	157,8	78,2	–	144,6
SAE 1022.	19,0	0	3,5	6,5	9,5	56,3	619,0	28,5	290,0	88,3	–	177,2	85,8	–	168,2
St – 52.	18,0	0	3,0	6,0	9,0	59,0	674,0	47,5	477,5	–	42,6	418,6	98,3	–	229,8
F – 1140.	32,0	0	5,0	10,0	16,0	57,5	643,0	55,8	580,6	–	51,8	540,8	–	44,4	438,8
F – 1252.	25,0	0	4,0	8,0	12,5	53,9	575,3	52,3	548,8	–	50,0	513,0	–	45,4	448,4
F – 1270.	12,5	0	2,25	4,25	6,25	51,3	532,8	50,6	522,0	–	44,0	434,0	–	42,1	413,1

Observaciones: 1. en la tabla aparecen las medidas en Rockwell B y C (HRB y HRC), con sus respectivas medidas de conversión a dureza Vickers (HV), estas conversiones se pueden obtener interpolando los datos de la correspondiente tabla presentada al inicio de este capítulo (ver tablas 3.4 y 3.5).

El significado de las letras que aparecen en la tabla es el siguiente:

S = superficie.

d = distancia.

N = núcleo.

Capítulo 4: Análisis de los problemas actuales y soluciones.

4.1. Introducción.

En este capítulo a diferencia del anterior (el cual se enfoca en los métodos utilizados para la caracterización de aceros para poder generar una base de datos de aceros del mercado nacional y redactar el manual), se expondrá sobre la problemática actual que tiene el área de tratamientos térmicos de la empresa INVANAL, se mencionaran las causas que producen estos problemas y se dará la respectiva solución según sea el caso. Repasando lo expuesto en la sección 3 del capítulo 1, que se refiere al problema de investigación, mencionábamos que los problemas que se presentaban con frecuencia en el área de tratamientos térmicos eran los siguientes cinco:

- Piezas que cuando se templen nunca se endurecen.
- Piezas de un mismo material que producen diferentes resultados de dureza después de ser tratadas.
- Piezas que después de ser tratadas no presentan una dureza uniforme a lo largo de toda su superficie.
- Piezas que se agrietan durante el temple.
- Piezas que después de bonificada (templada y revenida), fallan prematuramente cuando entra en operación dentro de una máquina.

Cada uno de estos problemas tiene sus propias causas y su forma de corregirse, algunos problemas inclusive se interrelacionan entre si, es decir la causa de un problema, consecuentemente incide en el otro, en este capítulo se hace una sección para cada problema planteado y en cada una de estas secciones se explica claramente cual o cuales, son las causas que producen dicho problema y luego se explica la forma de solucionar cada uno de ellos.

Por otro lado, en este mismo capítulo; se presentan también algunos casos que fueron atendidos durante la estadía en la empresa, cada uno de estos casos cuenta con su hoja de registro que detalla claramente que pasa durante el proceso, a continuación se procede a continuar con las secciones de este capítulo.

4.2. Piezas que nunca se endurecen cuando se templan.

En este caso, cuando se realizó la investigación se determinó que las piezas que presentan este problema eran hechas de acero en barra perforada St – 52 el cual es el equivalente al acero AISI / SAE 1024, este acero en si, es un acero de bajo carbono; estos aceros no se pueden templan debido a que tienen poca cantidad de carbono, esto es lo que hace que cuando se templen no adquieran dureza.

Los aceros de bajo carbono solo pueden endurecerse por tratamientos térmicos superficiales, para este caso en si, lo mejor es cementar en caja, esa sería la mejor solución para endurecer este tipo de aceros, incluso en el mercado nacional se encuentran también los aceros de bajo carbono Cold Roll que es el mismo acero AISI / SAE 1018, también está el acero AISI / SAE 1022, que son otras dos alternativas para sustituir el acero en barra perforada St – 52 cuando éste no esté disponible.

4.3 Piezas de un mismo material que producen diferentes resultados de dureza después de ser tratadas.

En este segundo caso, cuando se realizó la investigación se determinó que las piezas que presentan este problema eran las hechas de acero F – 1252, F – 5220, Bohler K – 460, estos son los aceros más usados en el taller para tratarlos térmicamente, el problema en si, se presentaba cuando se hacia el temple de una pieza y el de una serie de piezas sobre el baño de aceite.

Todos estos aceros mencionados son aleados, por lo que se templan en aceite, las causas del porque cuando se templan no producen siempre el mismo resultado de dureza son dos, la primera se produce por una inadecuada agitación de la pieza al momento de entrar en contacto con el baño de aceite, lo que produce que la pieza de acero templada no alcance la dureza esperada debido a que la velocidad de enfriamiento también es insuficiente como consecuencia de la inadecuada agitación.

La segunda causa se produce porque al templarse en serie sobre el baño de aceite, este se calienta gradualmente; lo que hace que la velocidad de enfriamiento de la pieza disminuya con respecto a la velocidad crítica de temple, produciendo consecuentemente una disminución de la dureza.

Para corregir la primera causa de este problema se debe agitar adecuadamente la pieza de acero al momento del temple, la agitación debe ser enérgica si la realiza un operario, o si la agitación se realiza por un sistema de agitación debe procurarse que dicho sistema produzca un flujo turbulento para agitar la pieza, se sabe que para un mismo operario en cada temple la energía de agitación varía, es decir, un operario no siempre agita con la misma energía en cada temple, por lo que no debe esperarse que la dureza de la pieza producida en el proceso de temple sea siempre la misma, lo ideal sería que siempre el baño de aceite cuente con un sistema de agitación sea este por recirculación del aceite o por ventilación, adicional al sistema de agitación, el operario debe agitar la pieza en el baño para obtener mejores resultados. Para corregir la segunda causa se debe estabilizar la temperatura del aceite mediante un sistema de enfriamiento que evite que el aceite se caliente gradualmente.

Para solucionar este problema se propone el diseño de un sistema de enfriamiento y agitación del aceite el cual se encuentra en la sección C del apéndice, es un sistema sencillo el cual lo que hace es recircular el aceite, haciéndolo pasar por un radiador (que enfría el aceite) antes de devolverlo al tanque mediante una bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ HP de potencia, manteniendo así la temperatura del aceite estable, al mismo tiempo en el proceso de recirculación, el aceite ingresa de nuevo al tanque mediante cuatro chorros lo que produce la agitación por flujo turbulento del baño del aceite, de esta manera se corrigen las dos causas del problema simultáneamente a un bajo costo, esto debido a que la empresa ya cuenta con casi todo lo necesario para ensamblar este sistema, solo se tiene que hacer una inversión mínima en la compra de la bomba.

Actualmente la empresa cuenta con un tanque de aceite, el cual se muestra en la figura 4.1. A continuación.



Figura 4.1: Tanque con aceite que actualmente se usa en la empresa INVANAL.

A este tanque solo se le deben agregar unas mangueras con acoples, un radiador que la empresa ya tiene, también se le debe comprar la bomba para hacer recircular el aceite.

4.3. Piezas que después de ser tratadas no presentan una dureza uniforme a lo largo de toda su superficie.

En este tercer caso, al igual que el segundo, el problema se presentaba en los mismos aceros aleados, la causa de este problema es la descarburación, que en sí es una difusión del carbono hacia el medio durante el calentamiento de la pieza en el recocido y durante el temple de piezas, esta difusión del carbono al medio se produce en la superficie de las piezas de acero, especialmente se presentan en mayor grado en los aceros aleados, en los casos vistos en la empresa se observaba que los diferenciales de dureza en la superficie de las piezas alcanzaban hasta cinco unidades en la escala Rockwell C, lo cual no es normal en una pieza.

Para solucionar este problema se debe proteger la pieza contra la descarburación, esto se logra protegiendo las piezas de las siguientes tres formas; la primera forma se hace mediante cajas especiales para tal fin, la segunda forma se hace envolviendo la pieza en una lámina o papel de acero inoxidable y la tercera forma se hace colocando las piezas dentro de una caja en la cual se rodeen las piezas con virutas de hierro colado (fundición gris), con estas medidas se pueden proteger las piezas contra la descarburación.

A veces se acostumbra echar carbón dentro de la cámara del horno, pero esto no es muy recomendable porque se ha visto que los vapores del carbón aceleran el deterioro en los componentes del horno tales como la resistencia y la termocupla del termopar que al dañarse consecuentemente daña el mismo termopar, lo mejor para proteger las piezas contra la descarburación es temprar en hornos especiales que contengan una cámara con atmósfera protectora, pero el costo de estos hornos y sus insumos es alto, por lo que en la práctica es más factible aplicar las medidas ya mencionadas, con es suficiente para contrarrestar el problema.

Por último se debe procurar evitar el calentamiento prolongado de las piezas así como de calentarse a temperaturas mucho más elevadas que las que indica el fabricante de aceros en su catálogo, debido a que esto contribuye significativamente a incrementar la descarburación de las piezas así como de incrementar el tamaño de grano austenítico lo que eventualmente produce problemas no deseables en las piezas.

4.4. Piezas que se agrietan durante el temple.

En el cuarto caso, en la investigación se observó que el problema se presentaba indistintamente del tipo de acero, se agrietaban tanto las piezas hechas de acero de bajo carbono como las echas de acero aleado, lo que nos llevó a concluir que la causa no era el temple en el medio incorrecto, además de que los temples se realizaban en el medio recomendado por el fabricante en los catálogos, se meditó en la posible causa y se pensó que la causa podía ser que el diferencial de temperatura era lo suficientemente grande como para que la pieza al ser templada se agrietara, esto nos llevó a concluir que la causa de este problema estaba en el horno como efectivamente se comprobó.

Se procedió a revisar las partes del horno, se revisó las resistencias y no se encontró ninguna anomalía, luego se revisó el termopar y el pirómetro del horno y efectivamente se encontró que el termopar estaba dañado, se observó que la superficie de la termocupla estaba rota y con residuos de carbón, esto hizo que el termopar quedara expuesto lo que provocó su progresivo deterioro.

El deterioro del termopar se reflejaba en la medición de temperaturas que hacía el pirómetro del horno, las mediciones de temperatura mostraron que el horno estaba descalibrado alrededor de + 200 °C, esto se logró determinar con las mediciones (mediciones hechas con un pirómetro láser y otro de contacto) de la temperatura real de la cámara del horno, la cual no correspondían con las del pirómetro, se logró determinar que el pirómetro horno cuando media 600 °C, la temperatura real de la cámara era alrededor de 800 a 810 °C.

Una vez detectado el problema, se siguió trabajando con el horno bajo la asesoría de un operario con basta experiencia, quien basaba sus mediciones de temperatura con el color de la pieza de acero, eventualmente, el pirómetro del horno se arruinó del todo y hubo que cambiarlo por otro nuevo, se hicieron pruebas con el nuevo pirómetro y se observó que no había problema con las piezas.

En resumen, para este caso lo que sucedía con las piezas era que al templarse a una temperatura mucho mayor que la que requería la pieza, la alta velocidad de enfriamiento generada por el cambio excesivamente brusco de temperatura hacía que la pieza se agrietara porque no las tensiones térmicas generadas a la pieza, lo que producía el agrietamiento de las mismas. A continuación se presentan en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 el termopar dañado, el pirómetro antiguo y el nuevo.



Figura 4.2: Termopar dañado.



Figura 4.3: Pirómetro antiguo.



Figura 4.4: Pirómetro nuevo.

Después un tiempo en el que no se presentaron más agrietamientos en las piezas, se volvió a presentar el problema, en esta ocasión, se revisó de nuevo el horno y se determinó que no era la causa del problema por lo que procedió a revisar si el medio de enfriamiento era la causa, se verificó si la concentración de sales en el agua era adecuada y se revisó si el aceite estaba contaminado con agua, luego se encontró que tampoco era la causa del problema, por lo que se procedió a indagar el material y se encontró que el agrietamiento de las piezas se debía a que el material era desconocido.

En éste caso lo que sucedía era que se templaba material desconocido, éste material que se templaba, estaba en estado inicial bonificado, es decir; que el material ya había sido templado y revenido, también se encontró que las durezas de éstos materiales ya bonificados oscilaban entre 31 a 55 unidades de dureza en la escala Rockwell C.

Esto se determinó porque se comenzó a medir la dureza inicial de todas las piezas que se trataban térmicamente, esto con el fin de llevar el control de dureza paso a paso, así se descubrió que algunas piezas iban al proceso de temple con una dureza bastante alta, esto hacía que las mismas al templarse se agrietaran.

En resumen las dos causas de agrietamiento durante el temple de piezas eran:

- . Medidor de temperaturas del horno descalibrado.
- . Material no detectado como bonificado que se templaba.

La primera causa se corrige verificando periódicamente la calibración del medidor de temperaturas del horno para detectar a tiempo cualquier falla en éste dispositivos, esto para evitar la pérdida de materiales por procesos fallidos. La segunda causa se corrige midiendo la dureza inicial de las piezas antes del proceso de temple, incluso si el material es desconocido, la medición de dureza inicial contrarresta este problema, pues un material puede considerarse bonificado a partir de 25 unidades en la escala Rockwell C, cuando el material se detecta como bonificado lo que procede es someter el mismo a un recocido de alivio de tensiones.

4.6 Piezas que después de bonificada (templada y revenida), fallan prematuramente cuando entra en operación dentro de una máquina.

Varias son las causas que generan este problema, la primera causa se descubrió cuando, estas causas son:

- 4.5.1 Medidor de temperaturas del horno descalibrado.
- 4.5.2. Temple inadecuado de piezas.
- 4.5.3. Revenido insuficiente de piezas.
- 4.5.4. Montaje mecánico inadecuado de las piezas.
- 4.5.5. Tratamiento de piezas con composición química desconocida.

A continuación explicaremos cada una de estas causas.

4.5.1. Medidor de temperaturas del horno descalibrado.

La causa que contribuye con este problema ya fue corregida cuando se reparó el horno cambiándole el termopar, la termocupla y el pirómetro del horno, pero es bueno exponer como contribuye esta causa a producir el problema, básicamente lo que sucede en este caso es que cuando el horno está descalibrado, se corre el riesgo de sobrecalentar el material, esto genera que en el acero; el tamaño de grano austenítico se incremente produciendo una reducción significativa de la tenacidad y resistencia al impacto del acero.

Esto sucedió en el caso de un engranaje de acero 4140 instalado en la corona de una grúa perteneciente a una empresa constructora, esta pieza cuando se templó en el horno, el medidor de temperaturas estaba descalibrado, recordemos que el horno en ese tiempo marcaba + 200 °C de lo que se marcaba en la perilla, este acero se templó a 840 °C según la perilla, esto significa que la temperatura real de temple de la pieza era 1040 °C. El temple a 1040 °C hizo que el grano austenítico creciera lo suficiente para que se redujera significativamente su tenacidad y resistencia al impacto, esto hizo que cuando el engranaje se instalara dentro de la grúa, en su respectiva corona, la cual sin duda no estaba limpia; fuera impactado por una piedrilla la que hizo que el engranaje se rompiera, la pieza duró dos semanas en servicio, en la figura 4.5. Se muestra el engranaje roto por esta causa.



Figura 4.5: Engranaje roto por medidor de temperatura descalibrado.

4.5.2. Temple inadecuado de piezas.

Esta causa se genera principalmente en la construcción de engranajes, los temple de los engranajes se han estado realizando de manera tal que al final del revenido quedan con una dureza que oscila entre 52 a 58 Unidades en la escala Rockwell C, lo cual no es adecuado para estas piezas debido a que los engranajes no deben sobrepasar de 50 Rockwell C. Los engranajes son piezas que tiene un forma geométrica compleja, el mayor problema se presenta en los dientes debido a que los mismos tienen una sección transversal muy pequeña lo que hace que cuando se temple el engranaje la velocidad de enfriamiento de los dientes sea mucho mayor que la del resto de la masa de dicha pieza, esto produce que la dureza sea mayor en los dientes que en el resto de la masa del engranaje por lo que se debe cuidar que la dureza de los mismos no sea muy alta para que no fallen cuando entren en servicio dentro de una máquina.

El punto más crítico se encuentra en la raíz del diente ya que es justo en esa parte donde fallan los dientes, se recomienda que cuando se vaya a temprar la dureza de los engranajes no sobrepase los 50 Rockwell C, si bien es cierto que en las tablas de construcción de máquinas aparecen durezas muy por encima de este valor, como lo es el caso del acero 1045 que oscila entre 55 a 58 RC, o del acero 4140 y 4340 que oscila entre 57 a 62 RC y del acero 8620 que oscila entre 55 a 60 RC, no es recomendable que la dureza sea mayor a la cantidad ya mencionada debido a que los dientes tienden a fallar en su raíz.

Los últimos estudios indican más bien que el temple no es el mejor proceso para endurecer engranajes, que lo más recomendable es realizarle al engranaje un tratamiento termoquímico, ya que los engranajes requieren más resistencia al desgaste que dureza en toda su masa para tener buena durabilidad y esto se consigue con un tratamiento termoquímico, el más recomendado de estos procesos es la nitruración debido a que su temperatura de trabajo (580 °C) está muy por debajo de la temperatura de austenización de cualquier acero, lo que hace que el acero no se endurezca en el núcleo por efecto del temple.

Luego se recomienda la cementación, lo que pasa con este proceso es que es más caro porque el mismo debe ir acompañado de un revenido ya que generalmente la pieza luego de procesarse por cementado, se temple cuando se sumerge en el aceite debido a que la temperatura de trabajo ($800 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$) muchas veces sobre pasa la temperatura de austenización de la mayoría de aceros, lo que hace que el núcleo se endurezca como si se hubiera templado normalmente.

Cuando se aplica este proceso se recomienda que se use aceros para cementación o cualquier acero de bajo carbono para no tener que revenir las piezas después del cementado, esto por supuesto abarata más los costos y genera buenos resultados. Finalmente solo mencionaremos que los engranajes requieren de resistencia al desgaste debido a que son piezas con superficies de contacto sometidas a fricción, es por esto que requieren más de un tratamiento termoquímico que de un temple.

A continuación en la figura 4.6. Se presenta un caso de fractura de los dientes de un engranaje por exceso de dureza adquirida durante el proceso de temple y revenido.



Figura 4.6: Muestra y engranaje inadecuadamente templado.

En éste caso se ve la muestra (lado izquierdo) y el reemplazo de dicha pieza por un engranaje nuevo fabricado y tratado inadecuadamente en el taller de la empresa. Por último solo cabe mencionar que en el mercado nacional específicamente en la empresa INVANAL solo puede realizarse el cementado debido a que en el mercado nacional no se consigue los implementos necesarios para poder realizar el proceso de nitrurado, por lo que la única opción para tratar termoquímicamente engranajes es el cementado, se podría cianurar los engranajes pero la empresa que realiza este proceso lo cobra muy caro por lo que no se tiene fácil acceso a este proceso.

4.5.3. Revenido insuficiente de piezas.

Este caso se presenta en todas la piezas que se tratan en el taller debido a que las mismas se revienen en la mayoría de los casos en 30 minutos, el tiempo de revenido mínimo en todos los casos y para todas las piezas de acero es de 2 horas, esto se puede constatar en las hojas de registro de procesos que quedó en la empresa.

El problema de revenir solo media hora consiste en que las piezas no quedan bien destensadas, esto hace que las mismas sean de baja tenacidad por lo su resistencia al impacto también disminuye, recordemos que el proceso de revenido tiene como finalidad incrementar la tenacidad de las piezas de acero a costa de sacrificar la dureza, entre más suave quede el acero después del temple y revenido, más tenaz será; entre menos se reduzca la dureza del acero, será menos tenaz, esto vuelve a la pieza susceptible a fracturarse prematuramente durante servicio dentro de una máquina. Por otro lado no se detectó en ningún caso que alguna pieza se fragilizara en revenido, por último para el proceso de revenido se sugiere enfriar las piezas dentro del horno y revenir durante un tiempo de mínimo de 2 a un máximo de 3 horas según sea la cantidad de masa de la pieza a menores masas 2 horas y a mayores masas 3.

4.5.4. Montaje mecánico inadecuado de las piezas.

En este caso se pudo observar que el problema de falla en las piezas no se generaba en el tratamiento térmico, si no que una vez entregada la pieza al cliente, se devolvían porque se habían roto prematuramente, durante la pasantía en la empresa INVANAL se presentó tres casos de este tipo, el primer caso fue el de el engranaje de la grúa de la empresa constructora que ya mencionamos en la sección 4.5.1, se considera que el caso involucra un montaje mecánico inadecuado porque la maquinaria no estaba limpia al momento de hacer el montaje del engranaje, algo que no debería ocurrir.

El segundo caso fue el de unos pernos de un triturador de una empresa que fabrica materia prima para el sector de la construcción, en este caso, se trataba de un triturador cónico que servía para triturar piedra, el mismo estaba sujeto al suelo por cuatro pernos bastante grandes, el problema radicaba en que dicho triturador cuando estaba en funcionamiento, generaba un movimiento circular en la base, este movimiento recaía directamente sobre los pernos lo que hacía que estos fallaran por fatiga. Inicialmente, los pernos eran hechos de acero de bajo carbono (Cold Roll 1018 o 1022), estos duraban seis meses en operación y nunca fallaron por fractura; pero debido al movimiento circular se iban aflojando y la rosca se deformaba lo que hacía que cuando se querían socar de nuevo, no se pudiera porque la rosca de se había deformado. Se intentó solucionar el problema cambiando el acero con el que estaba hecho el tornillo, se reemplazó por otro tornillo del mismo tamaño y con las mismas características pero ahora hecho de acero 4140, este tornillo falló con fractura por fatiga a los cinco días.

En este caso el tornillo requiere que el núcleo sea tenaz para que resista el esfuerzo a la fatiga generados por el movimiento circular del mismo triturador, también requiere dureza en la superficie para evitar que la rosca se deforme y pueda volver a socarse cuando se afloje, por esta razón se procedió a sugerir que los tornillos fueran de bajo carbono (1018 o 1022) y que fueran cementados, ya que este proceso produce el efecto requerido por los tornillos para cumplir adecuadamente su función en el triturador, sujetar el mismo.

Sin embargo, la gerencia de producción tomo la decisión final de sugerir al cliente que arregle el problema de montaje mecánico que tenía el triturador y se limitó a seguir suministrando los tornillos de acero de bajo carbono. Se puede afirmar que el costo de esta decisión es mucho más alto que el cementar los tornillos, sin embargo así se decidió y manejo este caso.

El tercer caso fue la cuchilla de un troquel, que en realidad es una combinación del caso del medidor de temperaturas del horno descalibrado y un mal montaje en la troqueladora, ésta cuchilla se templo en el tiempo en el que el horno no funcionaba bien en lo referente a la medición de temperaturas, por lo que muy probablemente fue expuesta a un sobre calentamiento que hizo que su grano austenítico creciera haciendo que la pieza perdiera tenacidad y resistencia al impacto, la falla se presentó cuando la cuchilla estaba bajo operación, según el experto en troqueles lo que sucedió es que la cuchilla no estaba bien alineada, esto produjo que al momento de levantarse impactara con uno de los componentes de la misma troqueladora lo que produjo que la cuchilla se fracturara debido al impacto. A continuación, se presenta esta cuchilla en la figura 4.7.



Figura 4.7: Cuchilla de troquel de poca tenacidad y mal alineada.

Por último se quiere hacer ver que a pesar de que en dos de los casos contribuyó significativamente el problema del medidor descalibrado del horno, el problema de mal montaje mecánico está presente en estos dos casos y que el problema del mal montaje mecánico es muy común en la industria.

4.5.5. Tratamiento de piezas con composición química desconocida.

Este es el problema más grave de todos los presentados hasta ahora, trabajar con material de composición química desconocida es un arma de doble filo, no se sabe en realidad como va salir la pieza, de hecho casi nunca sale bien aunque no se detecten los defectos. Aquí se aplican dos leyes del optimismo de Murphy, “si algo puede salir mal, saldrá mal” y “el hecho de que las cosas estén mal, no quiere decir que no puedan empeorar”. Estas dos leyes nos llaman a la reflexión, la primera ley nos dice que debemos estar siempre abiertos a la posibilidad de que algo puede salir mal, por esta razón debemos hacer lo posible para que esto no suceda y la única forma de lograrlo, es hacer las cosas bien. La segunda ley nos dice que ya porque las cosas estén mal, eso no quiere decir que por eso no debemos hacer las cosas bien, debido a que las cosas pueden empeorar, en resumen lo que se quiere ilustrar con estas dos leyes es que siempre debemos hacer nuestro mejor esfuerzo por hacer las cosas bien. Se espera que después de esta breve reflexión, el lector comprenda la idea de mencionar estas dos leyes y se espera al mismo tiempo, sepa interpretar como se relaciona esta reflexión con la exposición de este caso. Luego de esta breve reflexión continuamos.

En este caso en particular; una falla en el proceso incrementa las pérdidas de carácter económico ya que la pieza debe ser reprocesada, lo que implica un gasto mayor de energía, tiempo y dinero. Cuando se trata del proceso de temple trabajar con piezas de éste tipo supone dos grandes probabilidades.

- No llegar a la temperatura de austenización.
- Sobrepasar la temperatura de austenización.

En el primer caso, lo que sucede es que la pieza no se temple correctamente por lo que no alcanzará la dureza esperada, esto implica volver a reprocesar la pieza de nuevo lo que incrementa el costo, generalmente este no lo cubre el cliente ni el empleado que trabaja para la empresa, por lo que este costo se absorbe por la empresa misma, por lo que sus ganancias se reducen o pierden del todo, esto es inadmisibile y contraproducente para la misma por lo que debe evitarse que esto pase.

Por otro lado, se tenía la mala costumbre que cuando sucede esto, la pieza se vuelve a temprar sin aliviar las tensiones generadas en la pieza por efecto del temple anterior, esto aumenta la posibilidad de que la pieza se agriete en el segundo temple, tal y como sucedió en el caso de un acople de acero F – 1140 (AISI / SAE 1045); en el proceso de dicha pieza se cometió el error de templar la misma en aceite, por lo que se consultó con la persona de producción encargada que debía hacerse, esta persona respondió que debía templarse de nuevo la pieza pero esta vez en agua, se hizo la recomendación de que antes de templar en agua de nuevo, se debía hacer un recocido de alivio de tensiones, pero la persona encargada de producción en ese momento ignoró la recomendación y ordenó templar otra vez en agua, en vista de que no se quiso atender la recomendación, se procedió a templar y sucedió lo esperado, la pieza se agrietó tal y como se muestra en la figura 4.8. A continuación.



Figura 4.8: Acople que se agrietó por segundo temple sin previo alivio de tensiones.

En este caso sucedió lo ya expuesto, la empresa absorbió el costo de producción de esa pieza, otro caso similar en donde ocurrió casi lo mismo fue en el caso de un cojinete de casquillo, esta pieza era de acero de bajo carbono (barra perforada St – 52 ó AISI / SAE 1024).

Se dio la orden de templar, sin embargo, se sugirió buscar otro acero que pudiera ser templable (1045 u otro), o mejor aún que se cementara para darle la resistencia al desgaste que requería la pieza debido a que el cojinete iba dentro de la articulación del brazo de una grúa por lo que la misma estaba expuesta al desgaste.

A pesar de la sugerencia o recomendación, se ignoró la misma y se ordeno templar, por lo que procedió a templar, volvió a suceder lo esperado, la pieza no se endureció, se ordeno dejar la pieza como estaba y que se entregara en ese estado al cliente, sin embargo se decidió insistir en cementar la pieza previo un recocido de alivio de tensiones para no entregarle al cliente la pieza en el estado en que se encontraba, ya que al estar suave la misma se iba desgastar rápidamente, esta vez la jefatura accedió a cementar pero solo la parte interna del cojinete y sin el recocido de alivio de tensiones, se indicó que el temple debía hacerse en agua y que el cementado debía hacerse en dos horas.

Se volvió a sugerir que el cementado mínimo debía hacerse en cuatro horas, también se sugirió que el temple debía hacerse en aceite para evitar que la pieza se agriete ya que el cementado a realizar se hacía a 925 °C, se hizo ver que en el cementado la velocidad de enfriamiento no era trascendente en el sentido que el endurecimiento en el cementado era por difusión, que si se templaba en aceite no iba a afectar la dureza superficial de la pieza. La jefatura accedió a que se templara en aceite pero se ignoró la recomendación del cementado en 4 horas, por lo que se procedió a cementar en dos horas, se templó en aceite, aparentemente la pieza quedó bien, se endureció más de lo esperado ya que en el momento de darle el acabado final en el torno costó bajarle las 7 milésimas que hacía falta, el proceso de desbaste duró alrededor de 3 horas y se realizó con cuchillas de carburo de tungsteno.

Si bien es cierto que todo salió relativamente bien, la pregunta es; ¿a que costo? se mantuvo satisfecho al cliente, pero a que cuanto se gastó? cuantas veces se encendió el horno?, se cobró el Carbón, el bicarbonato de Sodio y los otros insumos usados incluyendo la energía eléctrica consumida? hubo ganancias en la puesta en marcha del proceso? Realmente es correcto improvisar y trabajar a la carrera?.

Estas preguntas son las que hay que reflexionar para manejar bien el trabajo de tratamientos térmicos, no basta con solo mantener satisfechos a los clientes resolviendo a como se pueda los problemas que se presentan, se debe ver a que costo se mantiene satisfecho a los clientes, debido a que de nada sirve mantener satisfechos a los clientes si las utilidades de los procesos son bajas porque el costo de mantener satisfecho a los clientes es alto. Se debe hacer conciencia de esta situación y se deben tomar las medidas para que esto no pase. A continuación se muestra la pieza de este caso en la figura 4.9.



Figura 4.9: Cojinete templado y cementado.

En el segundo, caso lo que sucede es que se corre el riesgo de sobre calentar el acero, esto hace crecer el grano austenítico, haciendo que la pieza pierda su tenacidad y resistencia al impacto, tal y como sucedió con los casos ya expuestos (engranaje de grúa, la cuchilla del troquel) y al primer impacto la pieza se rompa. O bien puede suceder que la pieza se agriete en el temple.

También puede suceder que si se sobre calienta el acero durante tiempo prolongado, se forme la estructura de Witmanstatten o se queme el grano lo cual simplemente no tiene reparación del acero a nivel estructural.

4.7. Algunos comentarios importantes.

Los siguientes comentarios se consideran de mucha importancia debido a que presentan sugerencias muy saludables para la empresa INVANAL, la finalidad de los comentarios son para orientar a la empresa adecuadamente para que a futuro se comience a realizar las buenas prácticas de tratamientos térmicos dentro de la misma, generando así los mejores beneficios en todo sentido, desde la forma de realizar los procesos hasta los beneficios económicos que implican estas buenas prácticas.

La primera observación que se pudo apreciar en el área de tratamientos térmicos fue la falta de un horno, en toda área de tratamiento térmico se debe tener como mínimo dos hornos, un horno para temple y el otro para precalentado de piezas antes del temple, revenido y recocido. Se debe tener dos hornos porque de lo contrario sucederá lo que sucede actualmente en la empresa, se temple, se abre la compuerta del horno, se pega un ventilador a la cámara del horno para bajar lo más pronto posible la temperatura del horno para poder realizar el respectivo revenido, el proceso completo dura alrededor de 6 horas, por lo que la velocidad de procesamiento de piezas se ve limitado a este tiempo el cual produce que en el día se temple una menor cantidad de piezas que se podrían templar si se tuvieran los dos hornos.

Por otro lado, nunca se debe abrir la compuerta del horno y enfriar con ventilador después del temple debido a que las temperaturas son muy altas por lo que los diferenciales de temperatura provocan un enfriamiento brusco que terminaran dañando la resistencias del horno en el futuro, estos cambios bruscos de temperatura para enfriar la cámara del horno reducen el período de vida útil de las resistencias por lo que se sugiere evitar esta práctica.

En la figura 4.10 se puede apreciar la curva del horno marca Hupert de la empresa, se puede apreciar que la máxima temperatura es alcanzada en menos de 2 Horas, esto no es correcto, debido a que el tiempo mínimo que debe tener un horno para levantar la temperatura de piezas para el temple debe ser de 3 horas para no generar daños a la estructura del acero.

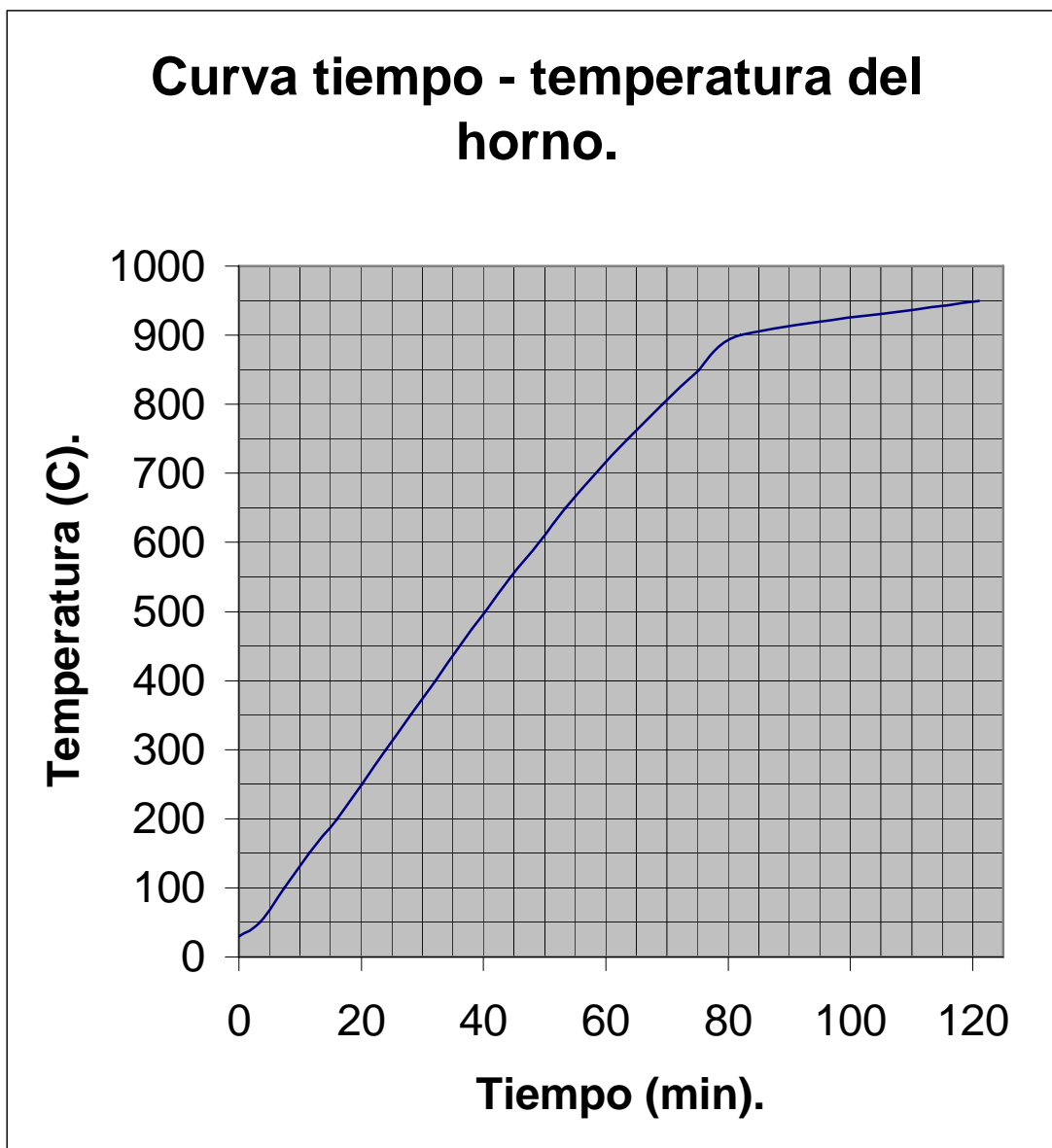


Figura 4.10: Curva de tiempo de calentamiento del horno.

Lo que sucede en este caso es que el rápido calentamiento produce sobre tensiones en la pieza que no son deseables, ya que eventualmente esta se puede fracturar, de aquí se deduce que los temple en la empresa IVANAL no se practican bien del todo debido a la rápida velocidad de calentamiento del horno. Por esta razón, se sugiere que se re programe el control del horno de manera tal que el mismo tarde 3 horas en levantar la temperatura de la pieza a la crítica para evitar que las piezas fallen por sobre tensiones generadas en el calentamiento de las piezas durante el temple.

Con respecto al control de calidad, nos enfocaremos en dos equipos, el primer equipo es el medidor de dureza, en este caso se sugiere conseguir otro nuevo, se propone el diseño de un medidor de dureza por rebote de balón el cual se puede ver en la sección D del apéndice, para solucionar temporalmente el problema.

El segundo equipo es el que sirve para la identificación de aceros, en este caso se puede realizar la prueba de chispa, esta prueba se puede efectuar en el esmeril de la empresa, los parámetros de comparación se presentan en una tabla que viene en el manual.

Para finalizar, solo se desea comentar a cerca de una práctica que se efectúa en el proceso de temple del acero F – 1140 (AISI / SAE 1045), este acero cuando se temple se sigue un procedimiento incorrecto, las piezas de este acero se meten en el horno una vez que se alcanza la temperatura crítica, luego se espera una hora y se temple en agua con sal que contiene más del 10 % de cloruro de sodio (NaCl) en solución acuosa.

Esto es completamente incorrecto, primero toda pieza de acero antes de templarse debe precalentarse a 600 °C durante alrededor de 30 minutos, luego se lleva a la temperatura crítica, se mantiene durante el tiempo adecuado y se temple en el medio adecuado, para este caso el agua con sal al 10 % de cloruro de sodio está bien.

Pero con más del 10 % no se recomienda debido a que a mayor cantidad de cloruro de sodio mayor será la velocidad de enfriamiento lo que acompañado de un calentamiento brusco (recordemos que la pieza entra al horno sin precalentarse y una vez que se ha alcanzado la temperatura crítica), produce que la pieza pueda agrietarse durante el temple. A continuación se presenta en la figura 4.11. Un engranaje hecho de acero F – 1140 (AISI / SAE 1045) que fue templado incorrectamente.



Figura 4.11: Engranaje de acero F – 1140 (1045) templado incorrectamente.

Estos serían los comentarios más importantes que se podrían realizar, cabe notar que la finalidad principal de estos comentarios es hacer ver donde están los errores para corregir los procesos y mejorar así la calidad de producto final que es lo que realmente se quiere lograr.

Capítulo 5: Discusión de resultados.

En esta sección el enfoque se centrará solo en las pruebas de los tratamientos térmicos realizados a todos los aceros del mercado nacional, pruebas las cuales serán el punto de partida de la redacción del manual de procedimientos de este proyecto; esta sección se dividirá en dos partes que son:

- . Discusión de resultados de las pruebas de temple y revenido.
- . Discusión de resultados de las pruebas de cementado.

5.1. Discusión de resultados de las pruebas de temple y revenido.

Comenzaremos mencionando los resultados de las durezas en estado de suministro, estos resultados se pueden ver en la tabla 3.9, lo primero que se puede observar es que las medidas se hicieron en su mayoría en la escala de durezas Rockwell B (HRB), excepto los aceros F – 1252 (AISI / SAE 4140) y el F – 1270 (AISI / SAE 4340), los cuales se midieron en la escala de durezas Rockwell C (HRC).

La razón por la que la mayoría de estos aceros se midieron en la escala de Rockwell B es porque estos aceros son suministrados en estado bruto de laminación, es decir; en estado recocido normal, ó también algunos de estos mismos aceros se suministran en estado recocido globular, tal y como se puede constatar en la tabla 3.3.

En la tabla 3.3 se puede observar que los aceros Cold Roll (AISI / SAE1018), AISI / SAE 1022, St – 52 (AISI / SAE1024) y el F – 1140 (AISI / SAE 1045) se suministran en estado bruto de laminación o recocido normal, mientras que los aceros grado herramienta F – 5220 (AISI / SAE O1), Bohler K – 460 (AISI / SAE O1), Molders 1.2344 (AISI / SAE H13) y el acero plata (AISI / SAE W1) se suministran en estado recocido globular. Estos aceros se caracterizan por tener una dureza muy baja por lo que no se pueden medir directamente en la escala Rockwell C, que es la escala más usada en los tratamientos térmicos de temple y revenido, deben medirse en la escala Brinell pero a falta de un medidor de dureza Brinell se puede usar un medidor de dureza Rockwell B y hacer la respectiva conversión a la escala Brinell.

Esto fue lo que se hizo en este proyecto, se midió en la escala Rockwell B del medidor Hoytom y luego se usó la tabla de conversión que el medidor trae en su manual, esta tabla fue reproducida en este informe y es la tabla 3.5 con la cual se pueden corroborar las conversiones de las medidas tomadas y escritas en la tabla 3.9, la conversión de todas las medidas fueron anotadas en la misma tabla 3.9 donde se especifica estas medidas convertidas en la escala Brinell (HB).

Los aceros F – 1252 (AISI / SAE 4140) y F – 1270 (AISI / SAE 4340) se midieron directamente en la escala Rockwell C debido a que su estado de suministro es el estado bonificado, por estado bonificado se entiende que estos aceros fueron previamente templados y revenidos, en este caso; el revenido es de alta temperatura (alrededor de 500 °C) por lo que la dureza no es muy alta tal y como se puede constatar en la tabla 3.9 (alrededor de 25 y 27 Rockwell C respectivamente) pero a pesar de su baja dureza, estos materiales tienen una dureza suficiente como para poder ser medidos directamente en la escala Rockwell C. para efectos de hacer una comparación de la dureza medida con la que aparece en el catálogo del fabricante se convirtieron las durezas de estos dos aceros medidas en la escala Rockwell C a la escala Brinell mediante la tabla 3.4 que es una fiel reproducción de la tabla correspondiente al manual del medidor marca Hoytom.

Por último, al comparar los resultados de dureza en estado de suministro de la tabla 3.9 y que se están en la escala de dureza Brinell, con las durezas de estado de suministro de la tabla 3.3 que también están en la escala Brinell, se puede observar que todas las mediciones de la tabla 3.9 caen en los rangos de dureza de la tabla 3.3 excepto la dureza medida en el acero Cold Roll (AISI / SAE1018).

Esto significa que a excepción del acero Cold Roll (AISI / SAE 1018), todos los aceros cumplen al menos en lo que se refiere a las mediciones de dureza, con lo establecido en los catálogos de los fabricantes de acero ya que la tabla 3.3 es una reproducción resumida en una tabla de los valores de dureza que se pueden encontrar en los catálogos de los diferentes fabricantes de acero que suministran a las compañías que venden metal en el mercado nacional.

Los valores medidos y anotados en la tabla 3.9 comparados con los rangos de dureza que se muestran en la tabla 3.3 fueron los siguientes:

Para el acero 1018 el valor medido y anotado en la tabla 3.9 fue de 153 Brinell, mientras que el rango de dureza que se encuentra en la tabla 3.3 es de 111 a 149, por lo que se observa que el valor de dureza medido no cae dentro del rango establecido en el catálogo del fabricante. La razón del porque sucede esto se puede decir que simplemente el acero medido no es el acero 1018 y las razones del porque esto es así es porque el material fue tomado de unas varillas que fueron almacenadas en bodega, posiblemente a la hora de clasificarla el bodeguero se equivocó y marco una varilla de otro tipo de acero como una varilla de acero 1018, esto se podrá confirmar más adelante cuando se analice las mediciones de dureza durante el temple.

Para el acero 1022 el valor medido fue de 141 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 111 a 149 Brinell, para el acero 1024 el valor medido fue de 200,5 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 146 a 210 Brinell, para el acero 1045 el valor medido fue de 189 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 180 a 288 Brinell, para el acero 4140 el valor medido fue de 256 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 223 a 340 Brinell, para el acero 4340 el valor medido fue de 266 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 229 a 340 Brinell, para el acero O1 de la casa de aceros AUSA el valor medido fue de 170,8 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 195 a 245 Brinell, para el acero O1 de la casa de aceros Bohler el valor medido fue de 201 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 198 a 248 Brinell, para el acero H13 el valor medido fue de 126,8 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 197 a 241 Brinell, para el acero plata el valor medido fue de 197 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 180 a 285 Brinell, por lo que se observa que el valor de dureza medido de todos estos aceros si caen dentro de los rangos establecidos en los catálogos de los fabricantes. Ahora nos centraremos en los aceros en estado bonificado, como ya mencionamos estos aceros son el 4140 y el 4340 que generalmente son templados para el maquinado de engranajes, estos dos aceros, antes de templarse deben recocerse porque están en estado bonificado.

Estos aceros generalmente se les da un recocido para aliviar las tensiones generadas durante el temple y revenido de alta temperatura al que fueron sometidos previamente, del recocido de estos aceros se hicieron también las respectivas mediciones de dureza y los resultados pueden observarse en la tabla 3.10, se observa que las durezas medidas fueron para el acero 4140 el valor medido fue de 179 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 174 a 232 Brinell y para el acero 4340 el valor medido fue de 231 Brinell, mientras que el rango de dureza es de 217 a 240 Brinell por lo que finalmente para el proceso de recocido de estos dos aceros se puede afirmar que sus medidas de dureza caen dentro de los rangos establecidos en los catálogos de los fabricantes.

La principal razón de hacer estas comparaciones es porque comparar las medidas de dureza experimentales con las de los catálogos de los fabricantes tanto para piezas en estado de suministro como tratadas térmicamente, nos permite saber si las mismas cumplen con el comportamiento establecido no sólo por los catálogos del fabricante sino que también con lo establecido por los manuales industriales, esto nos da una idea de la calidad del material con el que estamos trabajando además de anticipar los resultados y el comportamiento que se pueden esperar de los aceros con los que estamos tratando.

Si por alguna razón algún acero se sale de lo establecido en los manuales o los catálogos del fabricante, se debe hacer una investigación más profunda del porque ocurre esto, en estos casos lo mejor es hacer un análisis metalográfico o mejor aún si es posible, hacer un análisis químico, para ver si no es la composición química lo que está produciendo que el acero se salga de los parámetros previamente establecidos.

Cuando no es posible hacer un análisis metalográfico y cuando no es posible hacer un análisis químico lo mejor es hacer comparaciones de dureza entre lo medido experimentalmente y las mediciones teóricas medidas por el fabricante, en el caso de este proyecto los dos análisis no eran posibles porque en el lugar no había equipos para el análisis químico y los equipos de análisis metalográfico no tenían módulo para hacer un registro fotográfico de muestras por lo que el análisis se tenía que hacer en sitio, pero al no quedar un registro de lo visto en el microscopio no se le puede probar a nadie que el análisis es cierto.

Ahora procederemos a analizar las pruebas de temple, con respecto a estas pruebas se pueden observar los resultados en la tabla 3.11. Lo primero que se puede observar es que templaron todos los aceros de bajo carbono, el acero 1018, 1022, y 1024; la finalidad de templar estos aceros era demostrar que no son aptos para el proceso de temple debido a que tienen una baja cantidad de carbono.

Se puede observar también que los valores de dureza son bastante altos, esto se debe a las condiciones de trabajo del horno, al hecho de que estas piezas fueron templadas bajo severas condiciones de calentamiento, es decir, que se esperó a que el horno llegara a la temperatura de austenización o crítica y se introdujeron las piezas dentro del mismo, se esperó 20 minutos y luego se templaron en agua y agua con sal, el temple en estos medios contribuyó también a que las piezas alcanzaran la durezas anotadas en la tabla 3.11. También influyó el elevado rango de temperatura al que fueron expuestas estas piezas (de 860 a 920 °C).

Al final podemos afirmar que la finalidad de demostrar que los aceros de bajo carbono no se pueden endurecer por el proceso de temple no se alcanzó en el caso del acero 1018 debido a que los valores de dureza alcanzado de este acero fue bastante alta, generalmente estos aceros alcanzan una dureza que no puede ser medida directamente en la escala Rockwell C, generalmente la dureza que este acero alcanza por temple es alrededor de 97 Rockwell B que son alrededor de 222 Brinell, este valor no puede ser convertido a Rockwell C por lo que podemos afirmar que su valor es un poco menor a las 20 unidades en esa escala, solo un valor de dureza quedó dentro del rango esperado, este fue el de la muestra templada en aceite a 920 °C.

Se observa en la tabla 3.11 que los valores de dureza en su mayoría alcanzan el material ensayado varían entre 36 a 54 Rockwell C, estos valores exceden los valores esperados por lo que se puede afirmar con seguridad que este acero ensayado no era acero 1018, lo que probablemente sucedió con este acero fue lo que ya mencionamos, las muestras se tomaron de la bodega con la etiqueta de acero 1018 que realmente no eran este acero, el error en este caso fue un error humano.

Con respecto al acero 1022 se puede observar que en agua la dureza de este acero varía de 25 a 39 Rockwell C, en agua con sal la dureza varió de 31 a 42 Rockwell C y en aceite alcanzó una dureza que varía de 5 a 14 Rockwell C, estas medidas nos demuestra primero que para los aceros de bajo carbono se alcanzan mayores durezas cuando se templen en agua con sal, se alcanzan durezas intermedias cuando se templen en agua y las durezas más bajas cuando se templen en aceite, este es el comportamiento esperado.

Lo anterior se debe a que para estos aceros, el endurecimiento depende únicamente de la velocidad de enfriamiento la cual debe ser siempre mayor a la velocidad crítica de temple, a mayor velocidad de enfriamiento mayor dureza, como ya se observó las mayores velocidades se alcanzan en orden de mayor a menor velocidad, en agua con sal, en agua y en aceite, cabe aclarar que a pesar de que el comportamiento del acero 1022 es el esperado, las durezas alcanzadas sobrepasan los valores esperados, los valores esperados para este acero varían de 20 a 27 unidades Rockwell C cuando son templados bajo condiciones normales de calentamiento y enfriamiento.

Sin embargo, considerando las condiciones del proceso de temple ejecutados, se puede afirmar que el objetivo de demostrar que este acero no endurece mucho por el proceso de temple se alcanzó parcialmente ya que este acero alcanzó un máximo de 42 Rockwell C bajo condiciones severas de calentamiento y en el medio más apto para endurecer este acero, este valor aún es suave. Con respecto al acero 1024 se puede observar en la tabla 3.11 que en agua con sal alcanzó una dureza que varió de 43 a 45 Rockwell C, en agua varió de 40 a 45 Rockwell C y en aceite la dureza varió de 33 a 40 Rockwell C, se puede observar que el comportamiento es el esperado igual que el acero 1022 y al igual que el acero 1022 los valores de dureza son un poco altos debido a las mismas razones se puede afirmar finalmente que el objetivo de demostrar que este acero no endurece por el proceso de temple porque la dureza máxima alcanzada fue 45 Rockwell C en el medio más adecuado de temple y bajo condiciones severas de calentamiento, tomando en cuenta estas condiciones, se puede afirmar que este valor no es tan suave pero tampoco es excesivamente duro, por lo que se puede suponer que el objetivo de demostrar que este acero no endurece mucho en el proceso de temple se logró parcialmente.

Con respecto a la precisión experimental de las medidas de estos aceros no se puede afirmar nada ya que el porcentaje de error de las medidas no puede calcularse debido a que no existe el referencial teórico para ejecutar la ecuación del porcentaje de error que es la siguiente:

$$\% Error = \frac{Valor_{teorico} - Valor_{experimental}}{Valor_{teorico}} * 100$$

En los manuales de tratamientos térmicos no aparece la dureza que deben alcanzar los aceros de bajo carbono porque no se acostumbra a templar estos aceros, el acero del que se tiene registro que menos cantidad de carbono tiene en el proceso de temple es el acero 1037, este es el acero que menor cantidad de carbono tiene del que se tiene registro que puede templarse.

Con respecto a la dureza mostrada en la tabla 3.11 del acero 1045, de los aceros aleados 4140 y 4340, y los aceros grado herramienta O1 tanto de la casa comercial AUSA como de la Bohler, del acero H13 y del acero W1 o acero plata, se puede observar que los valores superan en poco los valores esperados, esto se debe a las mismas razones que se expusieron para los aceros de bajo carbono, las severas condiciones de calentamiento y otros factores que ya mencionamos.

El comportamiento de todos estos aceros es el esperado, en el caso de los aceros aleados y los aceros grado herramienta se pudo observar que el mejor medio para templar estos aceros es el aceite especial para temple, se pudo observar algo muy curioso, todos los aceros aleados y grado herramienta sin excepción, se agrietaron durante el temple con agua y agua con sal, esto se debe a que la velocidad crítica de temple depende de la composición química del acero, se sabe que a mayor cantidad de aleantes y de porcentaje de carbono, la velocidad crítica de temple será menor, esto significa que el acero entre más contenido de carbono y mayor contenido de aleantes tenga, podrá ser templado en un medio menos energético o que genere una velocidad de enfriamiento de la pieza menor.

Por esta razón estos aceros cuando se templen en agua y en agua con sal no soportan el cambio brusco de temperatura debido a que por su naturaleza estructural no están capacitados para ser templados en estos medios. No debe confundirse el término de velocidad de enfriamiento de la pieza con el de velocidad crítica de enfriamiento de temple, son dos conceptos totalmente diferentes aunque muy relacionados, la velocidad crítica de temple es la velocidad mínima que requiere un acero para formar martensita en toda su masa, esta velocidad es fija y constante y depende de la composición de cada acero, de hecho cada acero tiene una velocidad de enfriamiento crítica de temple diferente. Mientras que la velocidad de enfriamiento de la pieza es la velocidad de enfriamiento real de la pieza durante el proceso de temple, esta velocidad no es fija varía según la pericia del operario que realice el proceso de temple.

Entonces al tener los aceros aleado elementos de aleación requieren de un medio de enfriamiento menos severos para alcanzar mejores y mayores resultados de dureza, templar en agua estos aceros resulta contraproducente, también se observó que en el acero 1045, 4140 y el acero W1(acero plata) se presentaron agrietamientos no esperados, esto se dio por una razón sencilla, estos aceros para poder identificarse y diferenciarse unos de otros, se marcaron con un centro punto, el efecto del golpe de este centro punto fue el generador del agrietamiento en estos casos, eso se debe a que la pieza al ser golpeada y marcada, queda con tensiones remanentes, toda pieza al sufrir un golpe se deforma y esta deformación produce endurecimiento de la pieza por acritud (endurecimiento por deformación en frío), esto produce las tensiones remanentes en el acero que al ser templado se agrieta por esos puntos de tensión debido a los cambios bruscos de temperaturas que implican el proceso de temple.

En la tabla 3.12 se puede observar los resultados de dureza de los aceros templados bajo condiciones normales, se observa que en esta tabla no aparecen los aceros de bajo carbono, esto se debe a que para el proceso de temple estos aceros no son materiales de interés, estos aceros es mejor ubicarlos en el proceso de cementado, se observa que las durezas son ligeramente menores a las que se pueden observar en la tabla 3.11, esto se debe a que las condiciones de temple son diferentes, en la tabla las condiciones de calentamiento de las piezas son severas mientras que en la tabla 3.12 no.

En la tabla 3.12 las piezas fueron introducidas en el horno desde el inicio del proceso, se llevaron a la temperatura de austenización, se esperó 20 minutos y se templaron, en este caso el porcentaje de error se puede calcular debido a que el referencial teórico se puede encontrar en la tabla 3.3, se toma el valor medio del intervalo de dureza que el acero alcanza en el temple y luego el valor experimental que es el valor medido y anotado en la tabla 3.12, luego con estos valores aplicamos la ecuación de el porcentaje de error y obtendremos una idea de la precisión con la que se trabajó a nivel experimental.

Los porcentajes de error para cada acero fueron:

Para el acero 1045:

$$\% Error = \left| \frac{54 - 59}{54} \right| * 100 = 9,25\%$$

Para el acero 4140:

$$\% Error = \left| \frac{56 - 57}{56} \right| * 100 = 1,78\%$$

Para el acero 4340:

$$\% Error = \left| \frac{55 - 54}{54} \right| * 100 = 1,85\%$$

Para el acero O1 de la casa AUSA:

$$\% Error = \left| \frac{62 - 62,2}{62} \right| * 100 = 0,32\%$$

Para el acero O1 de la casa Bohler:

$$\% Error = \frac{64 - 61}{64} * 100 = 4,69\%$$

Para el acero H13:

$$\% Error = \left| \frac{46 - 47}{46} \right| * 100 = 2,17\%$$

Para el acero W1:

$$\% Error = \frac{65 - 64}{65} * 100 = 1,53\%$$

Se puede observar claramente que el experimento a excepción del acero 1045, caen dentro de los límites permisibles de porcentaje de error, todos los aceros excepto el acero 1045 están por debajo del 5% de error, esto significa que el experimento se trabajó con una confiabilidad mínima del 95 % lo cual es aceptable en lo referente al diseño de experimentos con respecto al acero 1045 se puede decir que el experimento falló, la falla se debe a que posiblemente existió errores de procedimiento, probablemente en el momento de agitar no se hizo esta acción de forma enérgica por lo que no se obtuvieron los resultados esperados, sin embargo se puede observar que el valor de dureza cae dentro del rango esperado por lo que el problema se corrige simplemente con una agitación más enérgica y con la revisión de que el medio que es agua con sal contenga el 10 % de cloruro de sodio (Sal común) en su composición esta cantidad no debe ser ni menor ni mayor a la mencionada, también esto significa que el rango dado en los catálogos es poco confiable debido a que el rango de durezas establecido es muy amplio.

Para finalizar la discusión de resultados de las pruebas de temple es importante hacer una última observación la cual es sobre las diferencias en los resultados de dureza del acero grado herramienta O1 de la casa comercial AUSA y el acero grado herramienta O1 de la casa comercial Bohler, ambos aceros son equivalentes al acero grado herramienta O1 pero tienen diferentes resultados de dureza, porque?, esta pregunta encuentra su respuesta en la composición química de ambos aceros.

Si se observa la tabla 3.2 ambos aceros tienen 0,95 % de carbono, 1,10% de Manganeso, 0,25% de silicio, 0,5% de cromo, pero varían sus cantidades en el porcentaje de Vanadio y Tungsteno, el acero de la casa AUSA tiene 0,10% de Vanadio y 0,5% de Tungsteno; mientras que el acero de la casa Bohler tiene 0,12% de Vanadio y 0,55% de Tungsteno.

Estos dos elementos son elementos denominados alfégenos, esto significa que son elementos de solubilidad en hierro alfa, estos elementos producen en el acero una reducción de la zona de solubilidad en hierro gama, por lo que se disminuye la cantidad austenita, al haber una menor cantidad de austenita; cuando el acero se lleva a la temperatura crítica y se temple se forma una menor cantidad de Martensita por lo que la dureza del acero se reduce.

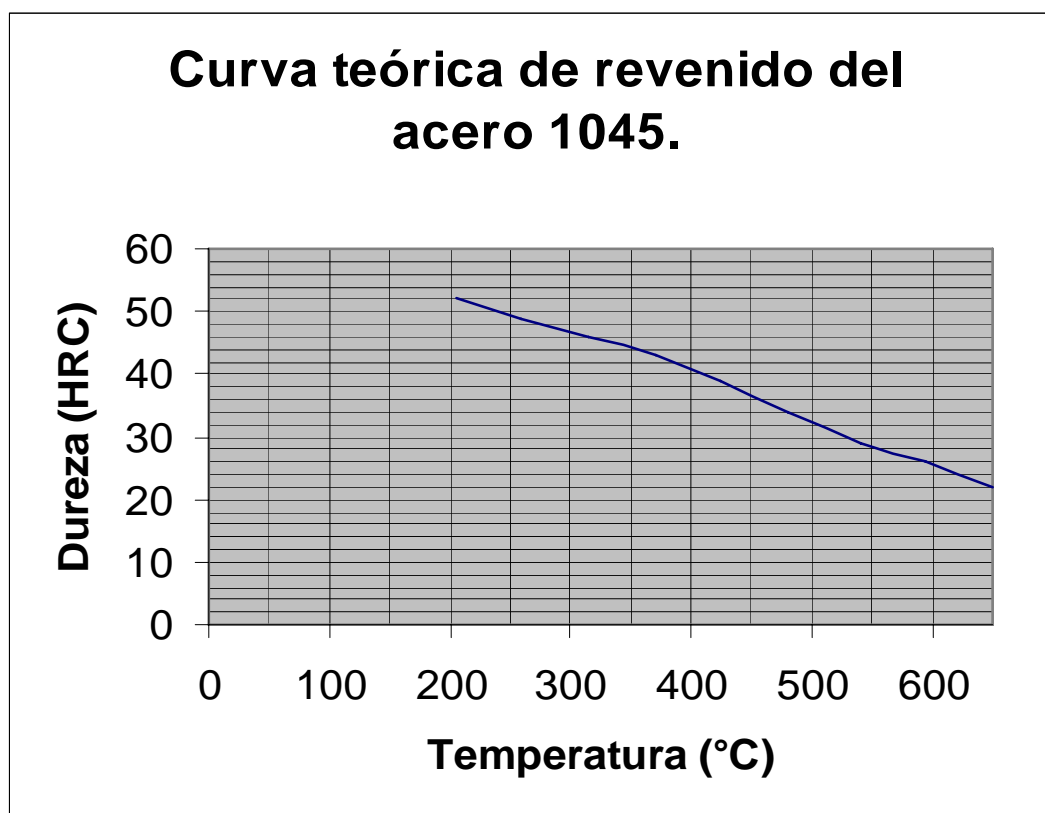
En este caso específico el acero grado herramienta de la casa comercial Bohler tiene más cantidad de Vanadio y Tungsteno por lo que producen en el acero una mayor reducción en la zona de solubilidad en hierro gama, produciendo esto una menor cantidad de austenita, esto hace que a la hora de templear este acero forme una menor cantidad de martensita por que la dureza será menor, esto se puede observar claramente en la tabla 3.12 de temple en condiciones normales y en la tabla 3.13 de revenido de aceros, al comparar esos valores de dureza se puede observar que los valores de dureza del acero de la casa AUSA son ligeramente mayores que los de la casa Bohler.

Por otro lado se ha detectado se detectado un error en la tabla 3.3 donde se presenta al acero Bohler con dureza que oscila entre 63 a 65 Rockwell C y al acero de la casa AUSA con una dureza que oscila de 60 a 62 Rockwell C, esto simplemente no es posible debido a lo ya explicado, sin embargo; las diferencias de dureza entre ambos aceros no son lo suficientemente grande como para preocuparse, ambos aceros tienen el comportamiento esperado y también durezas similares de modo que para aplicaciones industriales pueden usarse ambos de forma indiferente y sin ningún problema, estos datos se anotaron tal y como están en los catálogos del fabricante pero debe quedar claro que son datos errados.

Ahora procederemos a exponer los resultados del tratamiento térmico de revenido, lo primero que se puede observar es que para todos los aceros se cumple el comportamiento esperado que es, a menor temperatura habrá una menor reducción de la dureza en el acero, o bien a mayor temperatura la dureza será mayormente reducida; todos y cada uno de los aceros ensayados cumplen con este comportamiento.

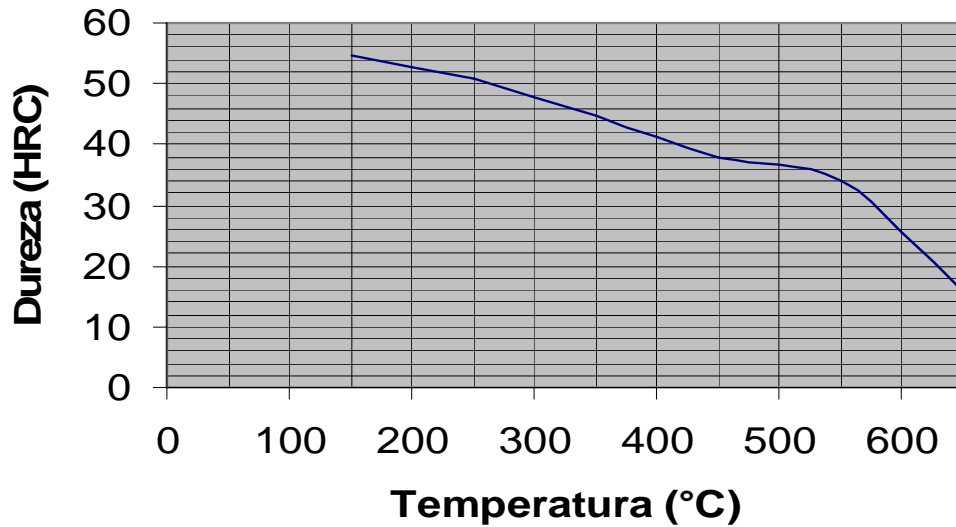
Las curvas experimentales y teóricas de revenido de cada uno de estos aceros se presentan a continuación:

Para el acero 1045 la curva teórica es:



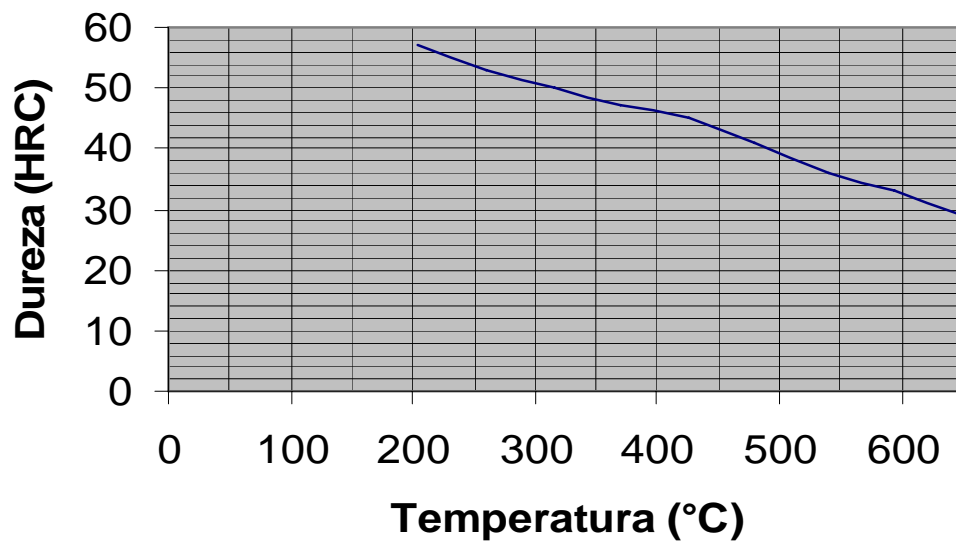
Para el mismo acero la curva experimental es:

Curva experimental de revenido del acero F - 1140 (1045).

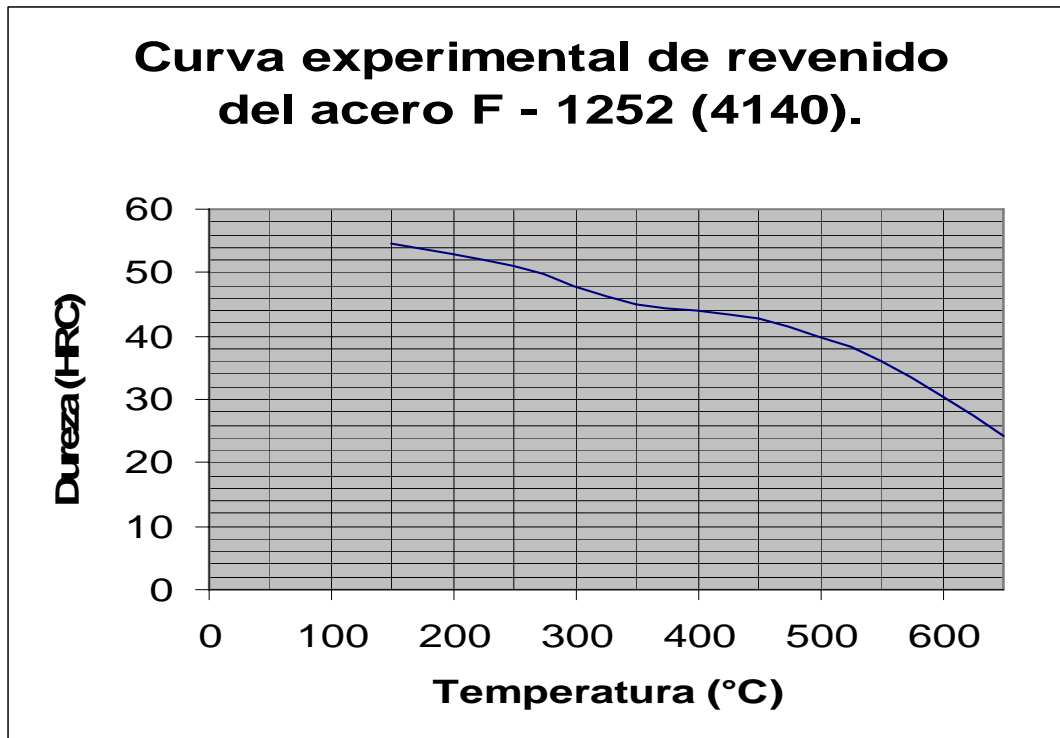


Para el acero 4140 la curva teórica es:

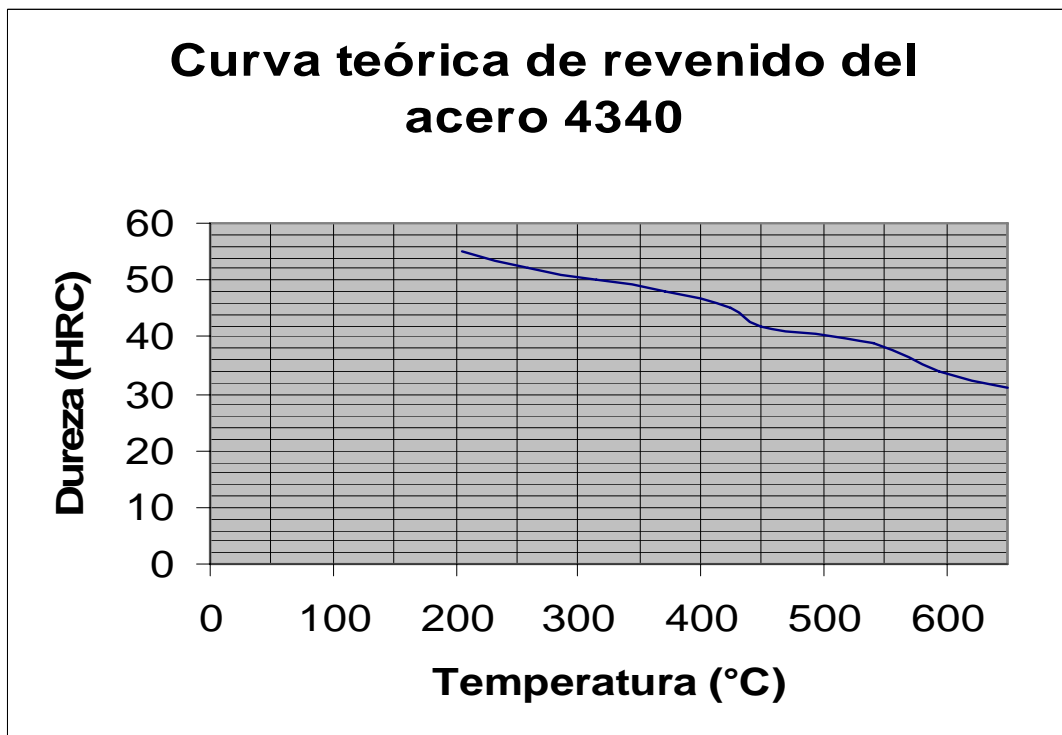
Curva teórica de revenido del acero 4140.



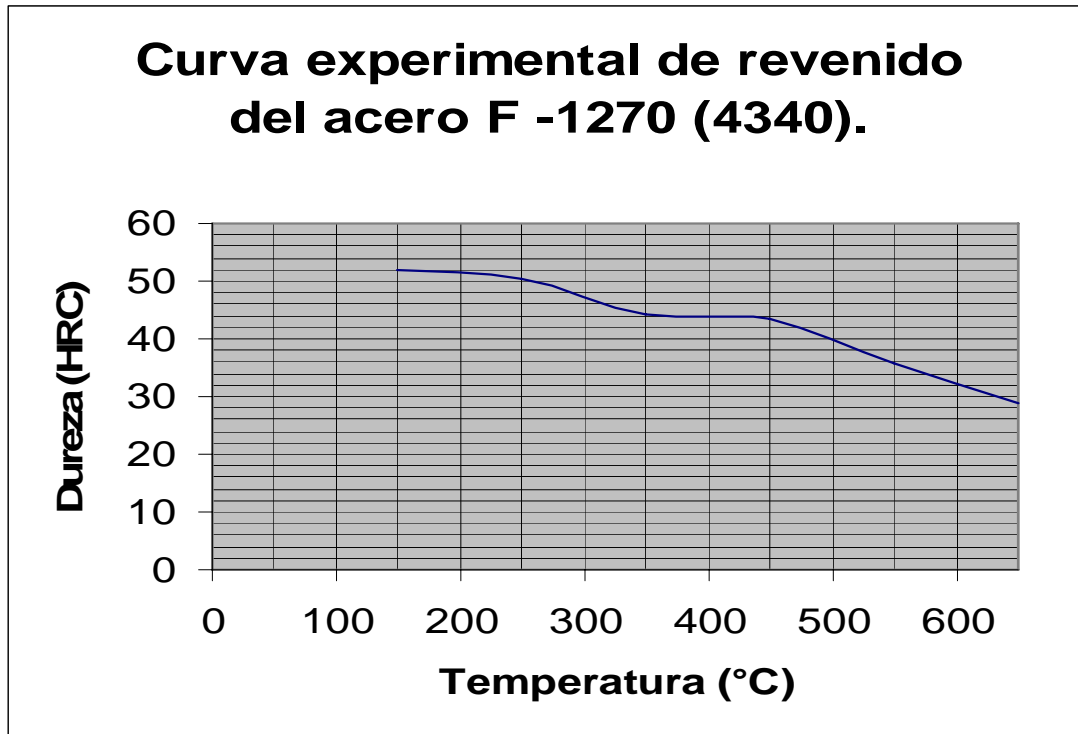
Para el mismo acero la curva experimental es:



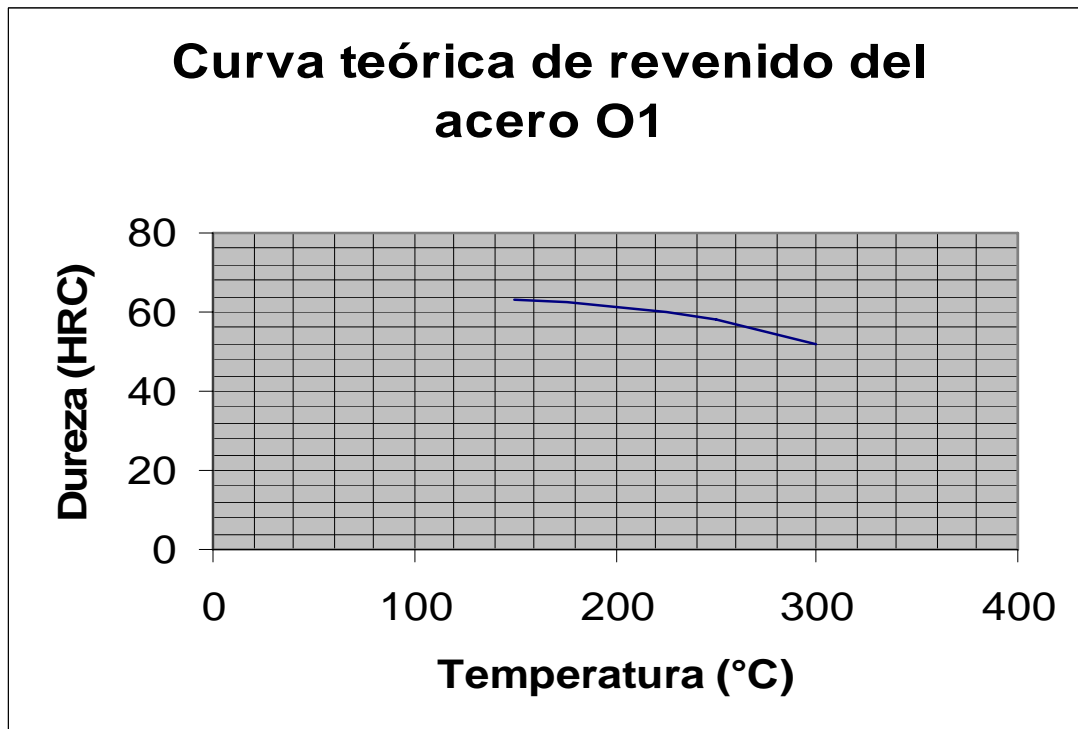
Para el acero 4340 la curva teórica es:



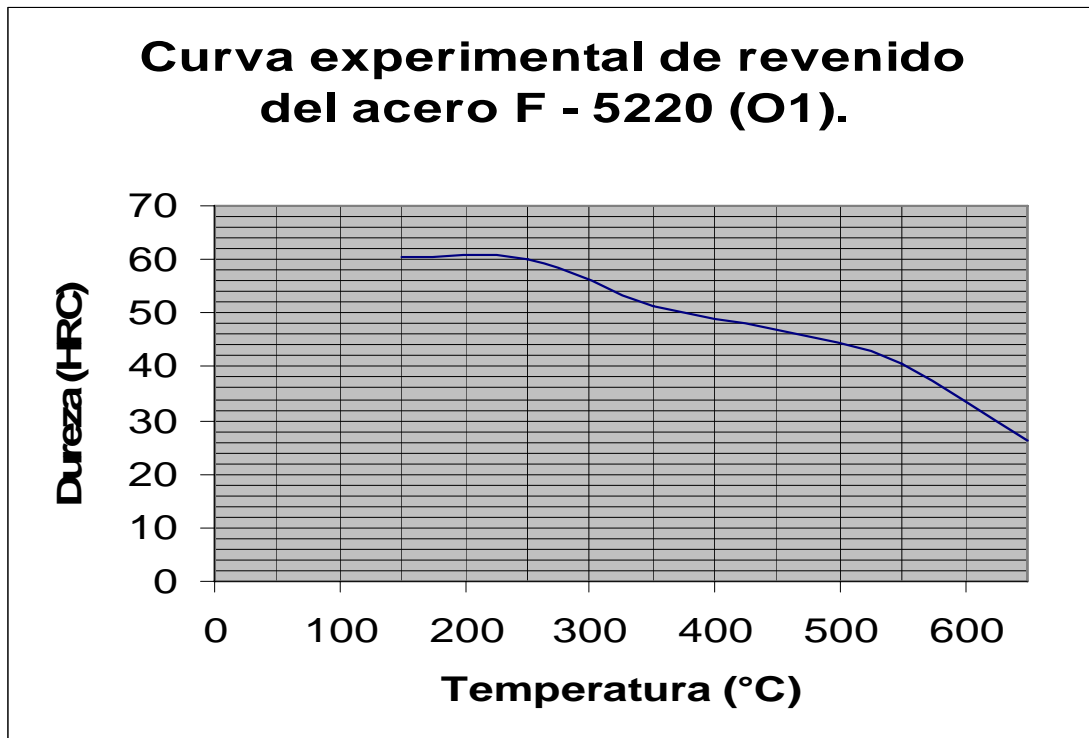
Para el mismo acero la curva experimental es:



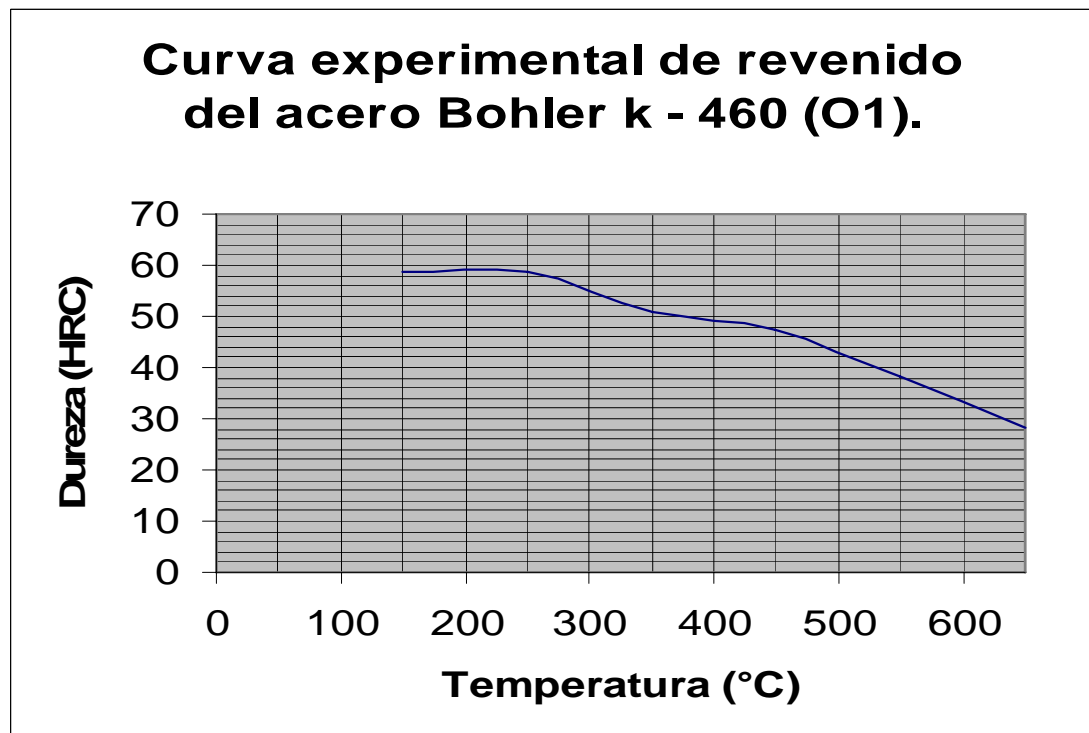
Para el acero O1 la curva teórica es:



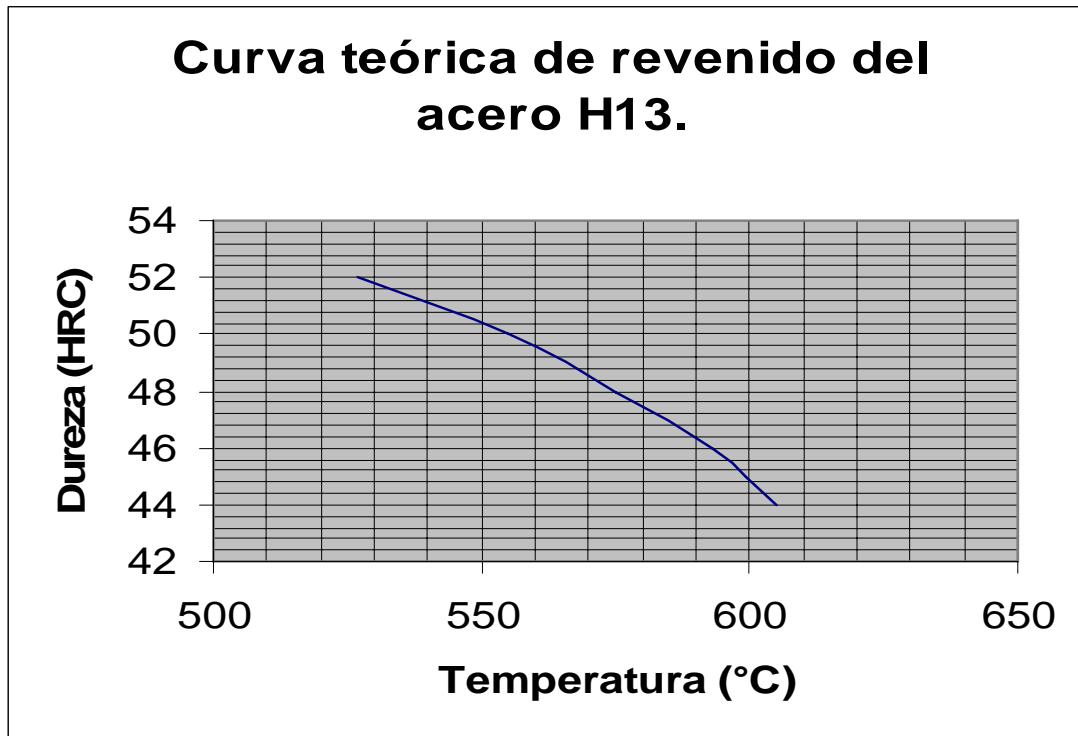
Para el acero O1 de la casa AUSA la curva experimental es:



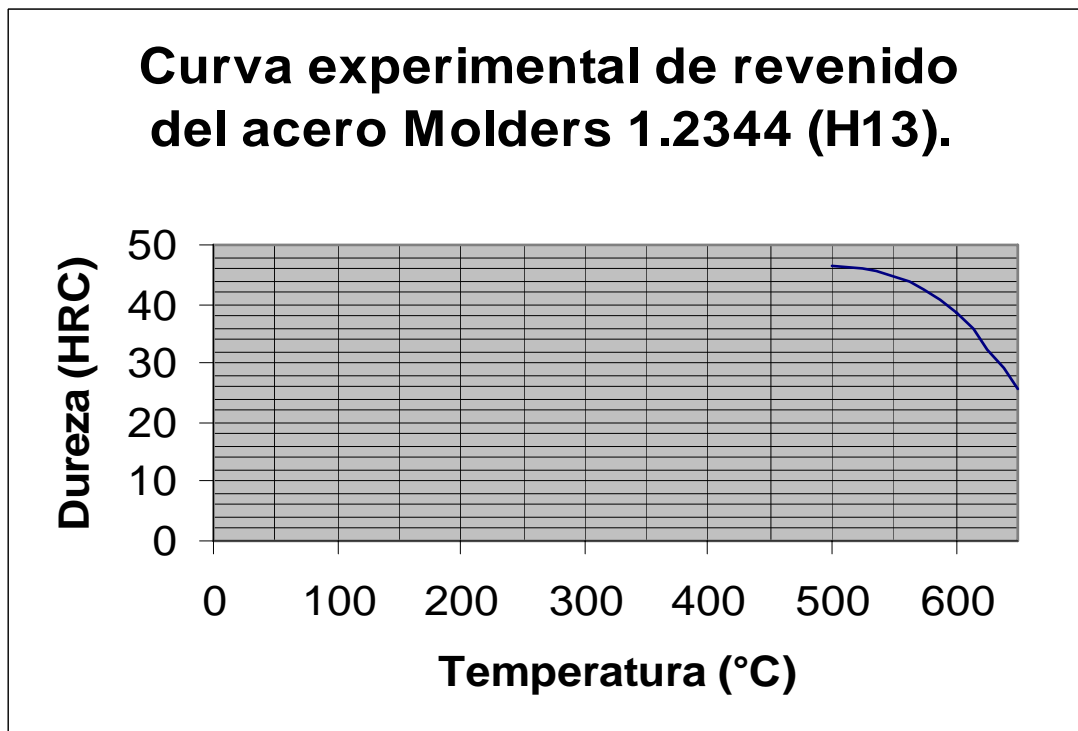
Para el acero O1 de la casa Bohler la curva experimental es:



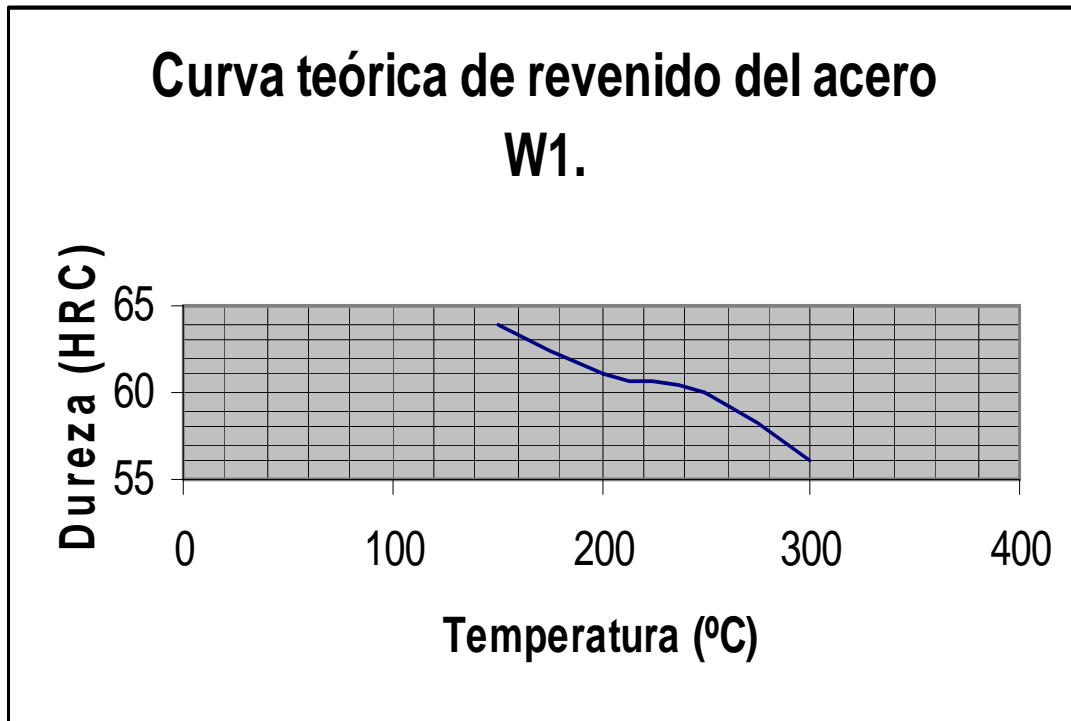
Para el acero H13 la curva teórica es:



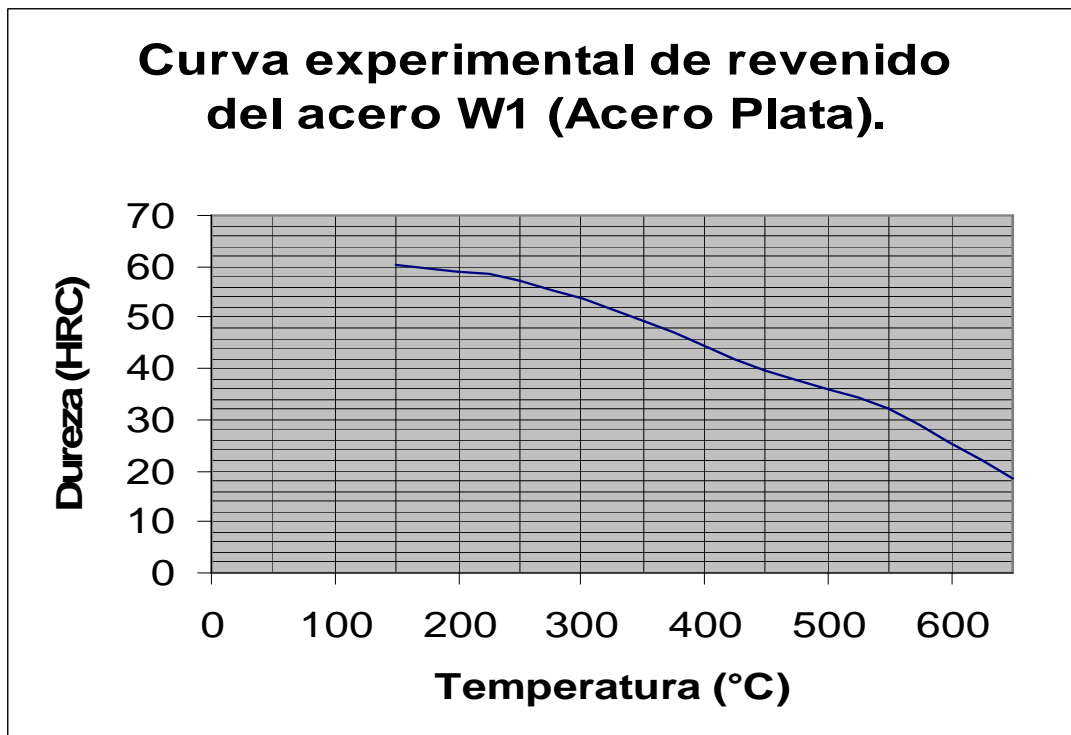
Para el mismo acero la curva experimental es:



Para el acero W1 (acero plata) la curva teórica es:



Para el mismo acero la curva experimental es:



Como ya mencionamos, puede observarse de las curvas presentadas que el comportamiento es el esperado, se observa también que en ninguno de los casos se presenta el fenómeno de endurecimiento secundario, con respecto a la confiabilidad experimental, en este caso si hizo difícil determinar los porcentajes de error debido a que los rangos de temperatura escogidos para el experimento no son los mismos rangos de temperatura que se seleccionan en los manuales, esto se debe a que en el sitio no se dispone de los manuales para la selección de los rangos de temperatura de revenido, sin embargo a pesar de que los rangos son distintos se puede hacer una estimación del porcentaje de error en las medidas interpolando y ajustando los valores teóricos con los valores experimentales interpolando los datos de la tabla de manera que estos se puedan calcular con la ecuación del porcentaje de error.

Las temperaturas experimentales que fueron seleccionadas para todos los aceros ensayados son 150, 250, 350, 450, 550 y 650 °C excepto el acero Molders 1.2344 (H13) cuyas temperaturas son: 500, 550, 600 y 650 °C, en los manuales las temperaturas seleccionadas son 205, 260, 315, 370, 425, 450, 540, 595 y 650 °C, para los aceros 1045, 4140 y 4340, para los aceros O1 y W1 las temperaturas seleccionadas en los manuales (ASM volumen 4 Heat treatments) son: 150, 200, 250 y 300 °C, mientras que para el acero H13 las temperaturas que se seleccionaron en el manual son: 527, 555, 575, 593 y 605, se observa que no hay compatibilidad en las mediciones por lo que hay que hacer calzar los rangos de temperatura mediante la interpolación de datos para poder calcular el porcentaje de error en las medidas.

Para cada temperatura corresponde un solo valor de dureza, el porcentaje de error se calculó con los valores de dureza interpolados según cada acero, los cálculos del porcentaje de error se omitieron debido a que el porcentaje de error es muy variado, esta variación oscila entre 0,74 al 19,43% lo que hace que los datos experimentales tengan buena confiabilidad en algunas medidas y muy baja confiabilidad en otras, la razón del porque de esta variación, radica en dos puntos, el primer punto es la interpolación de los datos, la operación de interpolación arrastra por si misma un margen de error elevado.

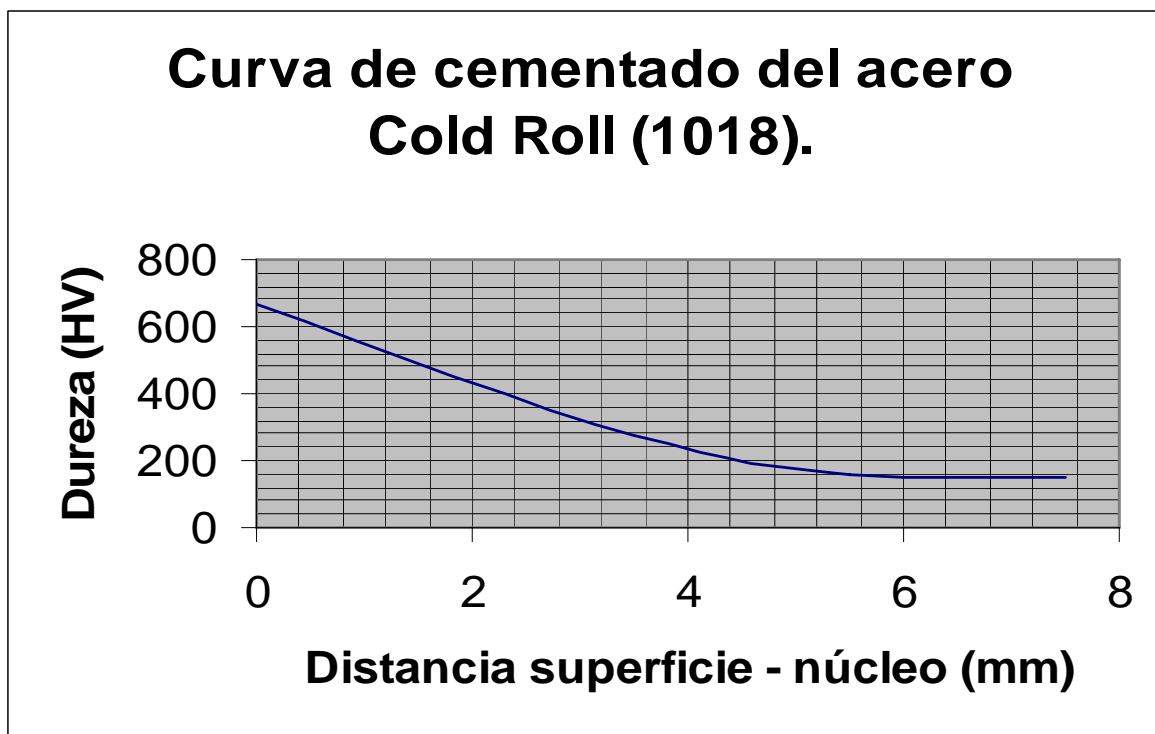
El segundo punto, el cual es muy técnico pero el más importante, es que las condiciones de los hornos con lo que se construyen las tablas de los manuales son muy distintas a las del horno con el que se trabajó en la empresa INVANAL. La diferencia radica en que los hornos para construir las tablas de los manuales son hornos de vacío o con atmósfera protectora controlada, estos hornos reúnen condiciones ideales de tratamientos térmicos con lo que se alcanzan óptimos resultados de dureza en las piezas que son tratadas dentro del mismo, mientras que el horno de la empresa INVANAL no reúne estas características.

Curiosamente se observó que a pesar de la baja confiabilidad en los datos calculados del experimento, las curvas de revenido de los aceros 4140, O1 de la casa AUSA y O1 de la casa Bohler funcionan muy bien para el horno de la empresa INVANAL, el margen de error de estas curvas que fueron probadas es muy aceptable ya que el porcentaje de error calculado en algunas piezas sobre las que se experimentó fue del 2 al 4%, lo que implica que para las condiciones de operación del horno de esta empresa la confiabilidad de trabajo del horno es de 97 al 98% lo cual es aceptable. Contrario a lo que se pensaba, la construcción de las curvas de revenido para tratamientos térmicos con el horno de esta empresa se justifica ya que por no reunir las condiciones que reúnen los hornos con los que se construyen las tablas de los manuales, se deben hacer las curvas de revenido para ese horno porque la confiabilidad de las curvas de revenido de los manuales es baja con respecto a las condiciones de operación del horno de la empresa INVANAL. Finalmente se puede afirmar que las curvas construidas son útiles, no todas las curvas que fueron construidas fueron probadas, solo las curvas de los aceros 4140, O1 de la casa AUSA y O1 de la casa Bohler, si por alguna razón las curvas de los otros aceros presentan una baja confiabilidad, se puede aducir es que la curva se construyó con un procedimiento inadecuado, en este caso se debe volver a construir experimentalmente la curva mediante el procedimiento establecido en el capítulo 3. Finalmente podemos decir que los resultados de las pruebas de temple y revenido fueron satisfactorios y cumplieron las expectativas esperadas por que con estos datos se puede construir el correspondiente manual de procedimientos que se presenta en un documento a parte. Ahora procedemos a pasar a la siguiente sección de este capítulo.

5.2. Discusión de resultados de las pruebas de cementación.

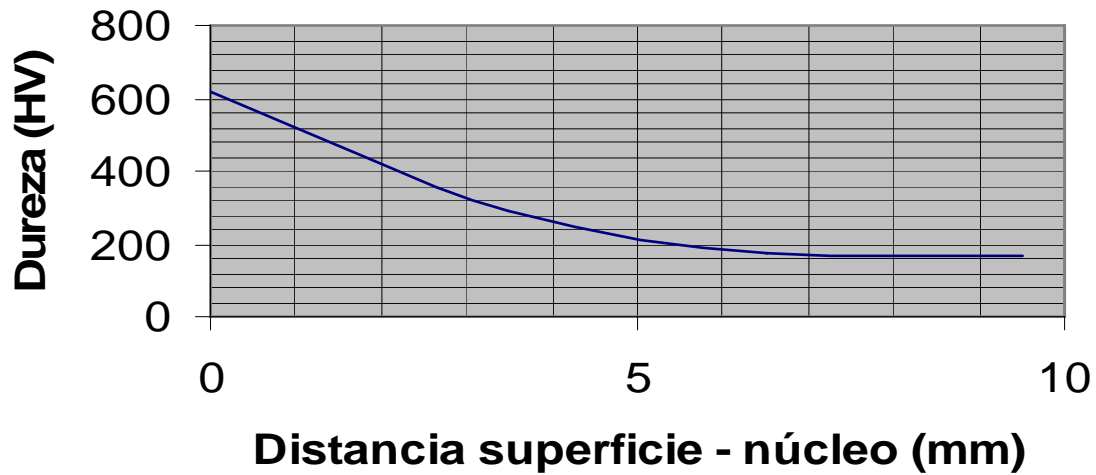
Con respecto a estas pruebas, se puede afirmar que todos los aceros ensayados cumplieron con el comportamiento esperado el cual es que la dureza decrece a medida que nos acercamos al núcleo de la sección transversal de la pieza, por otro lado debe quedar claro que el espesor de capa que se genere en el acero depende del tiempo en que se realice el tratamiento térmico, se sabe que a mayor tiempo de tratamiento habrá un mayor espesor de capa, el comportamiento de la dureza de piezas cementadas se puede ver claramente en las curvas de cementación de los aceros ensayados que presentamos a continuación:

Para el acero 1018 la curva de cementado es:



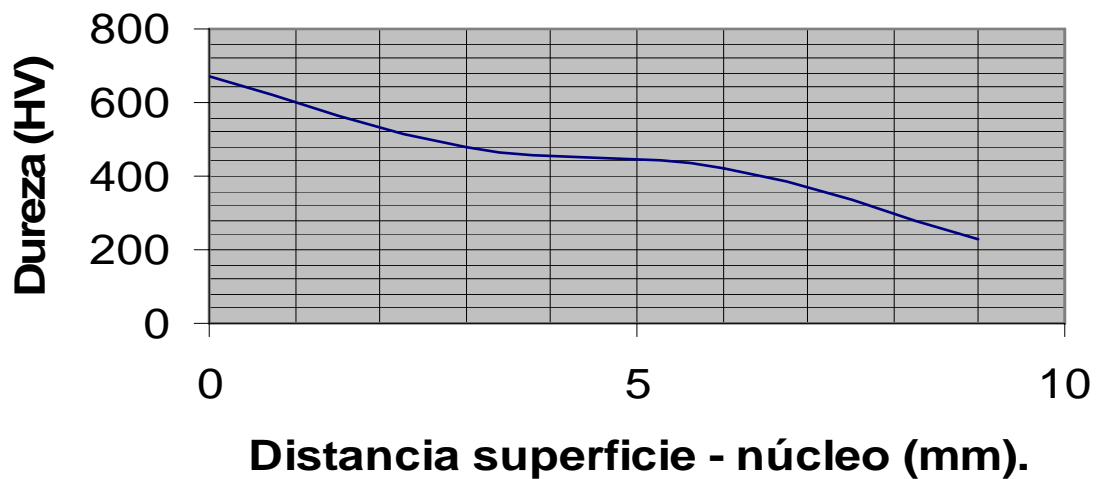
Para el acero 1022 la curva de cementado es:

Curva de cementado del acero 1022.



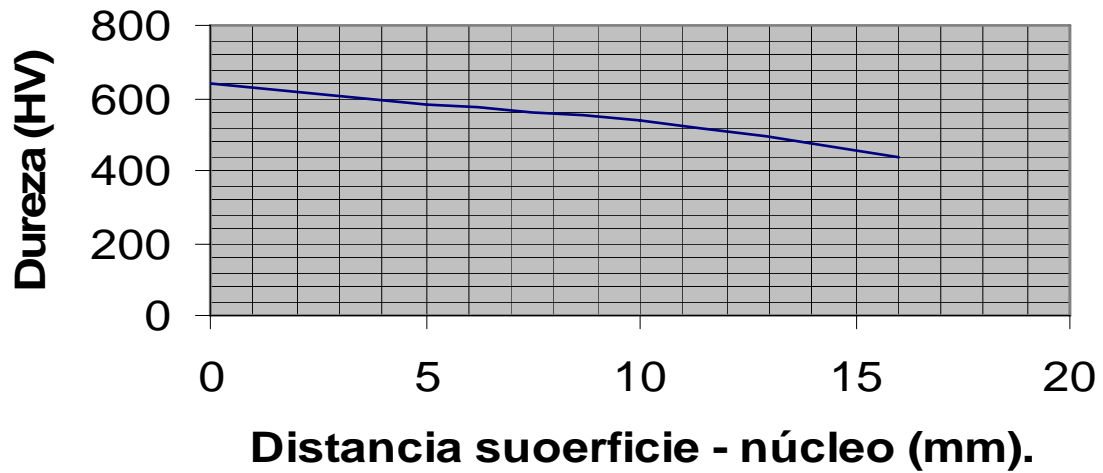
Para el acero 1024 la curva de cementado es:

Curva de cementado del acero St - 52 (1024).



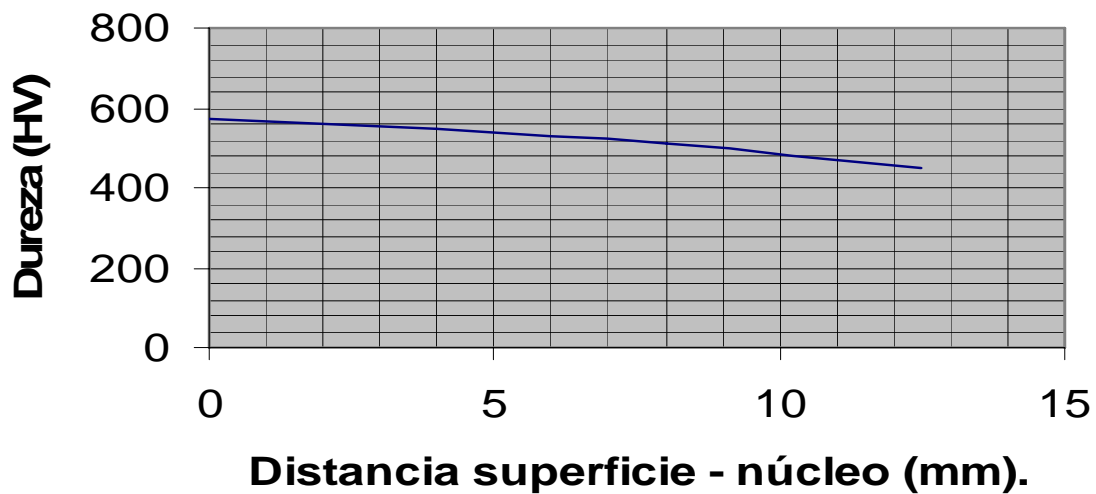
Para el acero 1045 la curva de cementado es:

Curva de cementado del acero F . 1140 (1045).

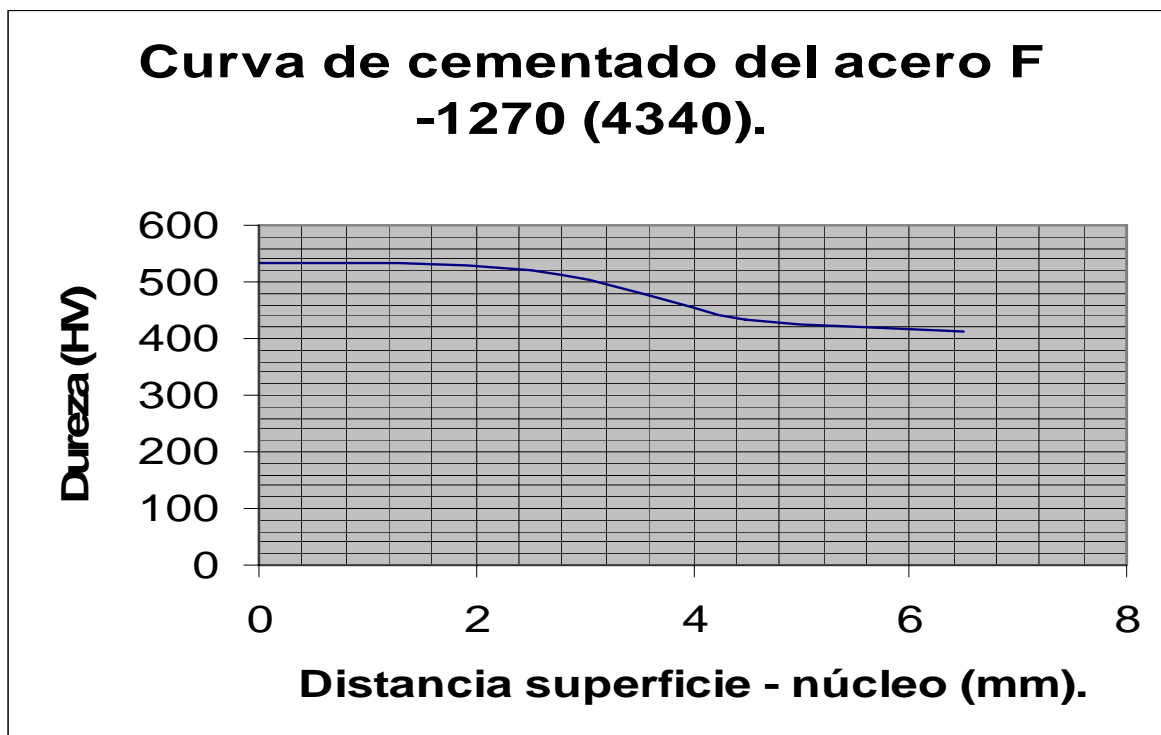


Para el acero 4140 la curva de cementado es:

Curva de cementado del acero 1252 (4140).



Para el acero 4340 la curva de cementado es:



Con respecto a este tratamiento térmico, no hay parámetros teóricos de comparación debido a que en los manuales no aparecen tablas con los rangos de dureza de la superficie al núcleo de los diferentes aceros por lo que calcular el porcentaje de error en este caso se hace imposible, lo importante en este caso es que el acero cumpla con el comportamiento esperado, lo cual en este caso, se cumple según las curvas ya mostradas, finalmente podemos afirmar también que los resultados de estas pruebas fueron satisfactorios y cumplieron con las expectativas esperadas. Ahora procedemos a dar las conclusiones del proyecto en general.

Capítulo 6: Conclusiones.

En la realización de este proyecto se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La medición de temperatura del horno debe ser lo más exacto y preciso posible debido a que si el medidor está descalibrado puede generar problemas de sobrecalentamiento del acero, lo cual incide negativamente en el acero ya que este sobrecalentamiento produce crecimiento del grano austenítico lo que reduce la tenacidad del acero.
- Las condiciones de calentamiento del horno inciden significativamente en las tensiones térmicas que se generan en las piezas por lo que debe procurarse que la velocidad de calentamiento dure alrededor de tres horas en el levantamiento de temperatura de las piezas dentro del horno.
- En el proceso de temple en serie, la temperatura del aceite debe mantenerse estable para lograr los mejores resultados, por lo que el tanque de aceite debe tener un adecuado sistema de agitación y de enfriamiento.
- El trabajar con materiales desconocidos produce una serie de problemas en los procesos de tratamientos térmicos, por lo que se debe evitar trabajar con dichos materiales.
- Con respecto a la caracterización de materiales, se lograron los objetivos debido a que los resultados en la mayoría de los casos fueron los esperados.
- En el proceso de temple el comportamiento esperado es un incremento en la dureza.
- En el procedimiento de revenido la dureza depende de la temperatura de revenido seleccionada y el comportamiento será a mayor temperatura habrá una mayor reducción de la dureza.

- En el procedimiento de cementado el espesor de capa dependerá del tiempo de tratamiento, a mayor tiempo, la capa tendrá un mayor espesor.
- La dureza en el cementado será solo superficial e irá decayendo a medida que nos acerquemos al núcleo de la sección transversal.
- Los engranajes por ser piezas con configuración geométrica compleja deben ser sometidos preferiblemente al proceso de cementación, si por motivos de fuerza mayor, la pieza debe templarse, la dureza del engranaje debe estar en el intervalo de dureza de 30 a 50 Rockwell C.
- Para una mejor calidad de producto final se requiere en planta los equipos adecuados tanto de operación como de protección.

Capítulo 7: Recomendaciones.

Para la empresa INVANAL se hace las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda tratar los aceros de bajo carbono por el proceso de cementado en caja, para lograr un endurecimiento satisfactorio.
- Para el temple de los aceros aleados y grado herramienta excepto el acero W1 (acero plata), se recomienda el aceite como medio de enfriamiento, el acero W1 puede templarse en agua para mejores resultados aunque se puede temprar también en aceite con muy buenos resultados.
- El aceite debe tener un sistema enfriamiento que estabilice su temperatura para obtener mejores resultados.
- El aceite debe tener un sistema de agitación que genere una velocidad de enfriamiento adecuada mediante un flujo turbulento para producir que la velocidad de enfriamiento sea uniforme a lo largo de su superficie.
- Se recomienda la compra de un horno de revenido de piezas para acortar el tiempo de procesamiento y así bajar costos de operación.
- Se recomienda la regulación de velocidad de calentamiento del horno marca Hupert usado para el proceso de temple.
- Se recomienda la compra de un estanque más grande para el almacenamiento del agua como medio de temple, lo mismo se sugiere para el aceite.
- Se recomienda que en la medida de lo posible se agencien de los respectivos manuales que conciernen a los procesos de tratamientos térmicos e incrementen su bibliografía sobre el tema.

Bibliografía.

American Society For Metals. Metals Handboock, Vol 4, ninth edition, Heat Treating. Ed. A.S.M. , E.U.A. 1967.

American Society For Metals. Metals Handboock, Vol 7, Atlas of Microestructures of Industrial Alloys. Ed. A.S.M. , E.U.A. 1972.

George Krauss. Principles of Heat Treatment of Steel. Ed. A.S.M., Ohio, E.U.A. 1980.

E. Oberg, F.D. Jones y H. L. Horton. Manual Universal de la Técnica Mecánica, 2da edición, editorial Labor, Barcelona, España, 1984.

Avner, Sydney. Introducción a la metalurgia física, 2da edición, McGraw – Hill, México D.F. 1988.

Hilly – Chausin. Curso básico de metalurgia física y aleaciones metálicas, editorial Monteso, Barcelona, España, 1963.

Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (G.T.Z). Tecnología de los metales, Editorial Reverté, Barcelona, España, 1984.

Pere Molera Solá. Tratamientos térmicos de metales, Productica Boixareu editores, Marcombo, Barcelona, España, 1991.

D. M. K. de Grinberg. Tratamientos térmicos de aceros y sus práctica de laboratorio, Noriega editores, LIMUSA, México D.F. 1986.

Centro Internacional Colombo – Alemán. Tratamientos térmicos, Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional (D. S. E.), Barranquilla, Colombia, Marzo de 1996.

Instituto Nacional de Formación Profesional. Tratamientos térmicos, División Mecánica Industrial, Tegucigalpa D. C., Honduras, 1988.

Apéndice.

Sección B: fotos de los equipos usados.

Equipos de FUNYMAQ.



Microscopio



Medidor de dureza.

Equipos de INVANAL



Medidor de dureza.



Horno de mufla Hupert

Equipos de INFOP



Microscopio Zusi.



Medidor de dureza HOYTOM.



Prensa de montaje Metalopress – 1.



Prensa de montaje Micropol – 1.

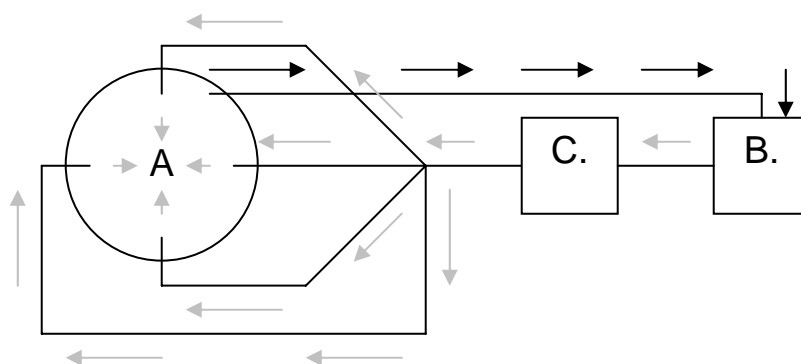
Sección C:

Diseño de un sistema de enfriamiento y agitación para el baño de aceite.

Introducción.

En vista de que el baño de aceite requiere de agitación, y de un sistema de enfriamiento para estabilizar su temperatura durante el proceso de temple, se propone el diseño de dicho sistema para el tanque que tiene la empresa.

Esquema del sistema de enfriamiento del aceite.



El sistema consta de una bomba, un radiador y dos mangueras, la primera manguera es simple, la otra debe adaptársele unos acoples para que la misma pueda seccionarse en cuatro partes.

Las flecha negra señalan el flujo de salida del aceite del tanque (A) el cual se dirige a la bomba (B), de la bomba pasa al radiador (C) donde se enfría el aceite y luego entra a la manguera de retorno al tanque, el

flujo sobre esta manguera se puede apreciar mediante las flechas grises del esquema, las mangueras pueden tener un diámetro de 12,7. mm ó ½ pulgada.

El sistema mostrado cumple con dos funciones, primero el de enfriar el aceite y segundo, el de agitar el baño de aceite mediante los cuatro chorros que entran al tanque, el flujo debe ser turbulento para que pueda darse la mejor agitación para obtener la mayor uniformidad de dureza en la superficie.

Al radiador se le puede agregar un ventilador para contribuir en el enfriamiento. La temperatura del aceite debe mantenerse entre los 40 a 60 °C para temple normal, para temple en baño caliente de aceite el máximo de temperatura debe ser 95 °C.

Las especificaciones técnicas de la bomba son:

Bomba tipo centrífuga.
½ Caballo de fuerza.

La razón principal del porque este tipo de bomba es porque es más económico y lo que se requiere es que el aceite circule alrededor del sistema por lo que no se necesita cambios de presión altas, se cree que con solo la velocidad de circulación del sistema se puede generar la agitación necesaria para generar un enfriamiento uniforme.

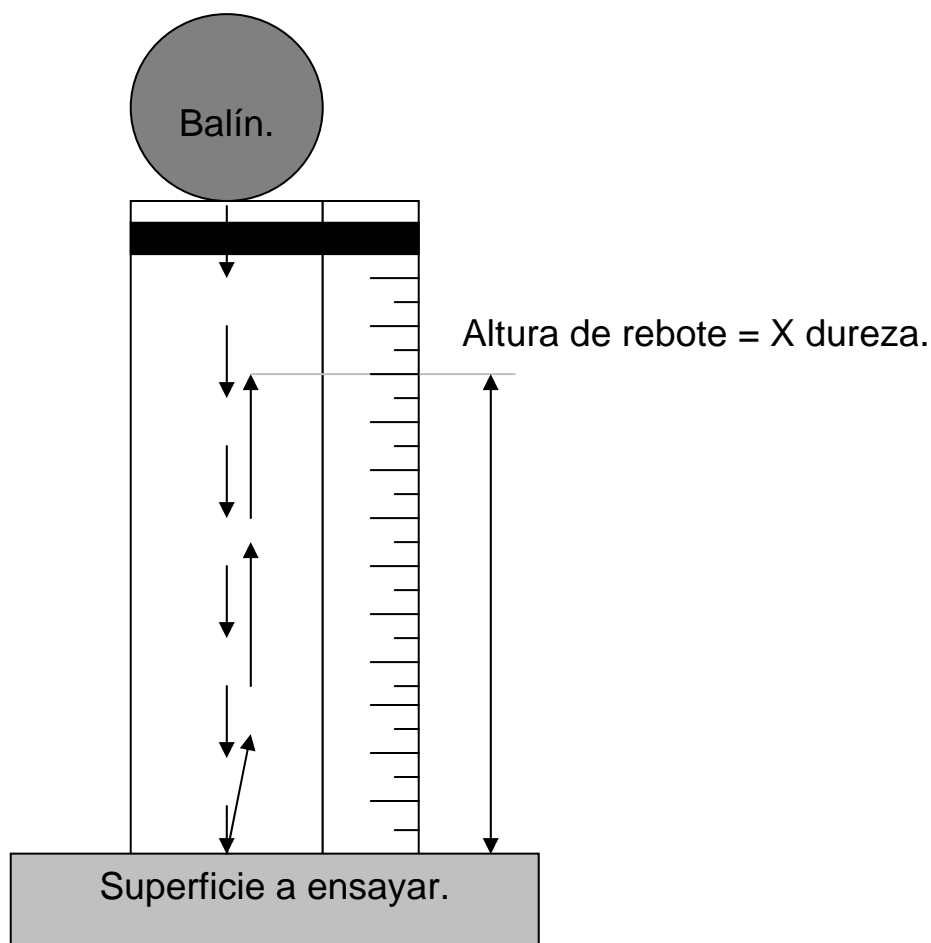
Sección D:

Diseño de un medidor de dureza por rebote de balón.

Como herramienta auxiliar del taller se tomó la decisión de presentar el diseño de un medidor de dureza denominado “medidor de dureza por rebote de balón” la idea presentar el diseño es que la empresa procure construirlo para ponerlo a funcionar lo más rápido posible, el medidor es fácil de construir y también es económico, el medidor consiste en determinar la dureza de los aceros en función de la altura de rebote de un balón cementado.

El medidor está constituido de un tubo de vidrio el cual lleva incorporado una regla con escala normal de medición de distancia, la misma será de aproximadamente 20 centímetros, este se colocará sobre la muestra, se le dejará caer a través del tubo de vidrio el balón el cual rebotará, este rebote alcanzará una altura la cual esta asociada a la dureza del material que recibe el impacto del balón.

Esquema del medidor de dureza por rebote por balón.



Para que el medidor funcione bien se debe asociar la altura de rebote con la dureza, experimentalmente esto se hace midiendo la dureza del material, luego se ensaya este material dejándole caer el balón, el mismo rebotará, justo en el momento del rebote se le debe medir la altura y anotarla, se puede construir para cada acero, una curva de dureza en función de la altura, es similar a la curva de revenido, se sugiere se siga el siguiente procedimiento.

Recolecte 11 muestras de un acero dado.

Temple estas muestras a la temperatura media del intervalo de temperaturas de temple, el temple se debe realizar en el medio más adecuado en el que el acero alcance la mayor dureza, para los aceros aleados se debe cuidar la descarburación de las piezas, esto se resuelve cubriendo las piezas con papel de acero inoxidable.

Ejecute el revenido de estas 11 muestras a temperaturas seleccionadas, por cada temperatura seleccionada, se debe revenir la pieza por dos horas, las temperaturas seleccionadas en esta ocasión deben ser 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600 y 650 °C, el enfriamiento debe ser al aire calmo.

Una vez revenidas las muestras, se deben limpiar en cepillo y luego llevar a un sitio donde se pueda medir la dureza con bastante precisión.

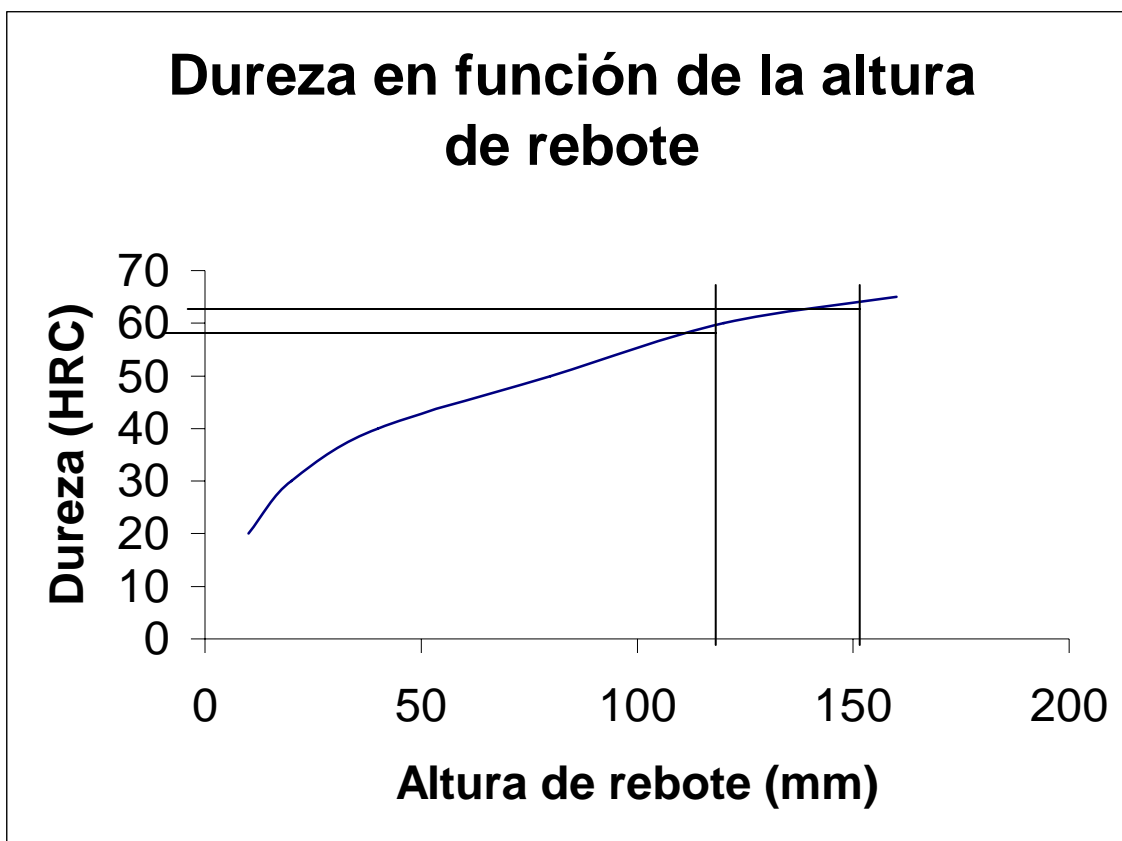
Una vez en sitio, se procede a pulir las superficies de las muestras.

Una vez pulidas las muestras, se debe medir la dureza de las muestras y se deben anotarlas.

Luego se procede a ensayar cada muestra, dejándoles caer el balón cementado, se anota la altura de rebote del balón.

Se construye una gráfica a partir de una tabla de la dureza en función de la altura de rebote, es decir la dureza en el eje de las ordenadas (eje y) y la altura de rebote en el eje de las abscisas (eje x).

En resume ese sería el procedimiento para construir la curva de la dureza en función de la altura de rebote. Esta curva nos serviría para poder determinar la dureza según la altura de rebote alcanzada por ejemplo, si la curva fuera la siguiente:



Si la altura de rebote de un acero fuera de 120 mm, la dureza de ese acero se determina como se muestra en la curva, ubicándose en 120 mm, se traza una línea recta hasta intersectar la curva, de ese punto, se traza otra línea que se dirija al eje de las durezas, obteniéndose así que para la altura de rebote de 120 mm, tenemos que corresponde una dureza de 59,9 unidades en Rockwell C.

O en su defecto, se puede observar también otro ejemplo, el caso de 150 mm, altura a la cual corresponde una dureza de 65 unidades de la escala Rockwell C. Esta curva se parece a la curva de revenido, sólo que en la curva de revenido el trazo de líneas se realiza desde el eje de las durezas, hacia el eje de las temperaturas, esto se debe a que en el revenido se selecciona la temperatura de revenido según la dureza que se le desee dar al acero.

En la curva, el comportamiento esperado es que a mayor dureza, mayor altura de rebote, esto se debe a que el diferencial de durezas entre la pieza a ensayar y el balón determina la altura de rebote, si la diferencia de dureza entre el balón y la pieza a ensayar es grande, eso significa que el material a ensayar es mucho más suave que el balón por lo que al chocar este contra la pieza, le producirá una hendidura que disminuirá la altura de rebote, en cambio entre más se acerque la dureza del material a ensayar menor será la hendidura producida por el impacto y mayor será la altura de rebote.

Se debe tener cuidado de que el balón siempre sea más duro que el material a ensayar, esto debido a que si ocurre lo contrario, el balón se deformará y quedará inutilizable para realizar más medidas de manera correcta, ya que la deformación del balón alterará las alturas de rebote en las medidas subsiguientes, lo que a su vez alterará los resultados experimentales a futuro.

Por último cabe aclarar que éste método no es la panacea de las mediciones de dureza, es un método que sirve para estimar la dureza de un material tratado térmicamente cuando no se cuenta con los recursos de alta tecnología que pueden otorgar otros equipos, tomando en cuenta que estos equipos son muy caros, éste método es económico y fácil de realizar, a su vez; su precisión es aceptable debido a que su margen de error no debe sobrepasar el 5% si se ejecuta el proceso de ensayo adecuadamente, el tamaño del balón puede ser de 5 a 10 mm y este debe ser cementado, es decir duro en la superficie y tenaz en el núcleo, se recomienda construir este balón en acero St – 52 (SAE – 1024).

Sección E: Manual de procedimiento.

INDUSTRIAS VARIAS NACIONALES.

INVANAL.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS MANUAL DE PROCEDIMIENTOS.

TEMPLE.

REVENIDO.

CEMENTACIÓN SÓLIDA.

Noviembre 28 del 2006.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS MANUAL DE PROCEDIMIENTOS.

**Yury Rodolfo Tomé Marincovich.
Instituto Tecnológico de Costa Rica.**

Contenido:

	Página.
1. Equipos de protección y elementos de trabajo.	4
2. Requerimientos mínimos de equipos de trabajo.	11
3. Datos de los aceros del mercado nacional.	12
4. Procedimientos para el temple de aceros.	14
5. Procedimientos para el revenido de aceros.	16
6. Procedimientos para el cementado en caja de aceros.	17
7. Tablas para el proceso de temple.	20
8. Curvas para el proceso de revenido.	26
9. Tablas para el proceso de cementación.	30
10. Control de calidad y la prueba de la chispa.	31

1. Equipos de protección y elementos de trabajo.

1.1. Equipos de protección.

Para todo trabajo en el campo de tratamientos térmicos, se debe utilizar equipo de protección porque, debido a la naturaleza de este trabajo, se hace necesario proteger al operador de las radiaciones de calor que pueden producir quemaduras, los equipos de protección están constituidos por elementos hechos de cuero y materiales especiales que aíslan el calor, el conjunto de protección está constituido por los siguientes elementos:

- Guantes.
- Delantal.
- Mangas.
- Polainas.
- Lentes de seguridad.
- Careta de protección con pantalla.

Guantes: Estos elementos están hechos de cuero o fibra de vidrio y su forma varía según puede verse en las siguientes figuras:



Figura 1.1: Guantes de protección.

Los guantes, sirven para proteger las manos, los guantes de fibra de vidrio justifican su uso, solo para los trabajos de tratamientos térmicos a muy altas temperaturas.

Debe evitarse en toda circunstancia, tomar piezas muy calientes con los guantes ya que estos se deterioran perdiendo flexibilidad y deformándose.

Delantal: Este elemento está hecho de cuero, su objetivo es proteger la parte anterior del cuerpo y las piernas hasta las rodillas. La forma del delantal se puede ver en la siguiente figura:



Figura 1.2: Delantal de protección.

Mangas: Esta vestimenta tiene el objetivo de proteger los brazos del operador, las mangas tiene una mayor aplicación en el campo de las soldadura, especialmente, cuando se realizan soldaduras de banco de trabajo y en posición plana. El tipo de manga que se usa en tratamientos térmicos se muestra en la figura siguiente:



Figura 1.3: Mangas de protección.

Polainas: Este elemento se utiliza para proteger las piernas y los pies del operador, las polainas pueden ser reemplazadas por botas altas y lisas con punta de acero, la forma de las polainas se muestran en la figura siguiente:



Figura 1.4: Polainas de protección.

Lentes de seguridad: Los lentes de seguridad son elementos de protección utilizados para preservar la integridad de los ojos del operario cuando este realiza labores de limpieza, esmerilado, torneado, rectificado, corte oxiacetilénico u otra operación donde se requiera la protección de la vista, existen varios tipos de lentes, estos se muestran en la siguiente figura:

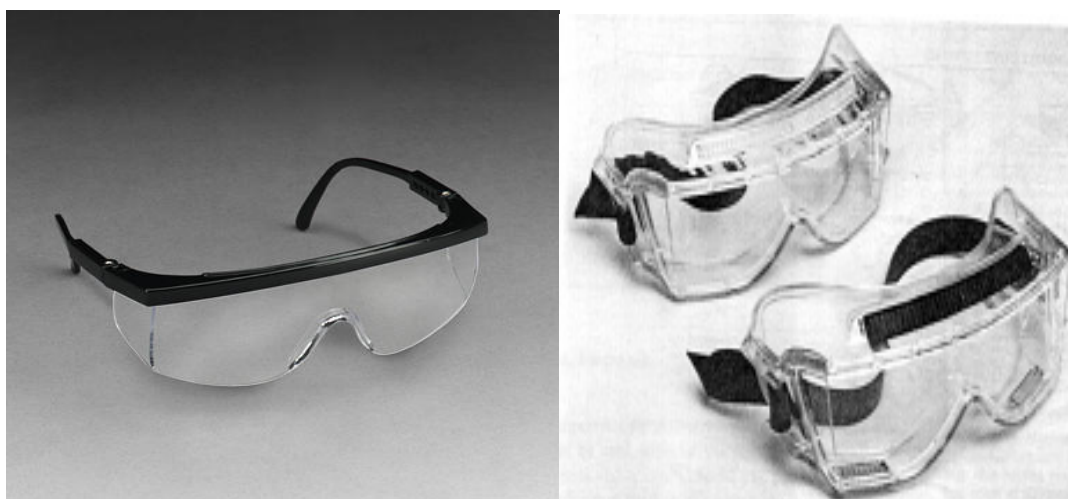


Figura 1.5: Lentes de protección.

Generalmente, los lentes están constituidos de cuerpos de plástico o metal que permiten el intercambio del vidrio o plástico transparente cuando se deteriora. Los lentes de protección deben ser de fácil colocación, resistentes y adaptables a la configuración de la cara.

Careta de protección con pantalla: Este dispositivo de protección es más completo que los lentes ya que el mismo, a parte de proteger los ojos del operador, protege también su cara, para las operaciones de tratamientos térmicos, este dispositivo se usa mucho cuando se va a sacar piezas del horno en el proceso de temple, ya que por las altas

temperaturas, es necesario proteger del calor, la cara del operador. Esta careta tiene una pantalla de plástico intercambiable, la careta de protección con pantalla, se puede ver en la siguiente figura:



Figura 1.6: Careta con pantalla de protección.

Elementos de trabajo.

Para facilitar la ejecución de tareas en los talleres de tratamientos térmicos, se emplean elementos que permiten movilizar o transportar las piezas o los materiales, siendo los más comunes:

- Tenazas.
- Ganchos.
- Cucharas.
- Cajas.
- Dispositivos de guía y sujeción.
- Tenazas y alicates de corte.
- Alambre de amarre.

De todos estos elementos de trabajo, solo se mostraran las imágenes de los más usados en el taller de tratamientos térmicos.

Tenazas: Son útiles contruidos en acero y están contruidos por una boca y dos brazos. Se usan para manipular las piezas cuando estas son introducidas o sacadas del horno, o de los baños de enfriamiento. Las tenazas se caracterizan por la variedad de formas que presenta la boca.

La tenaza y la variedad de formas de la boca se muestran en las siguientes figuras:

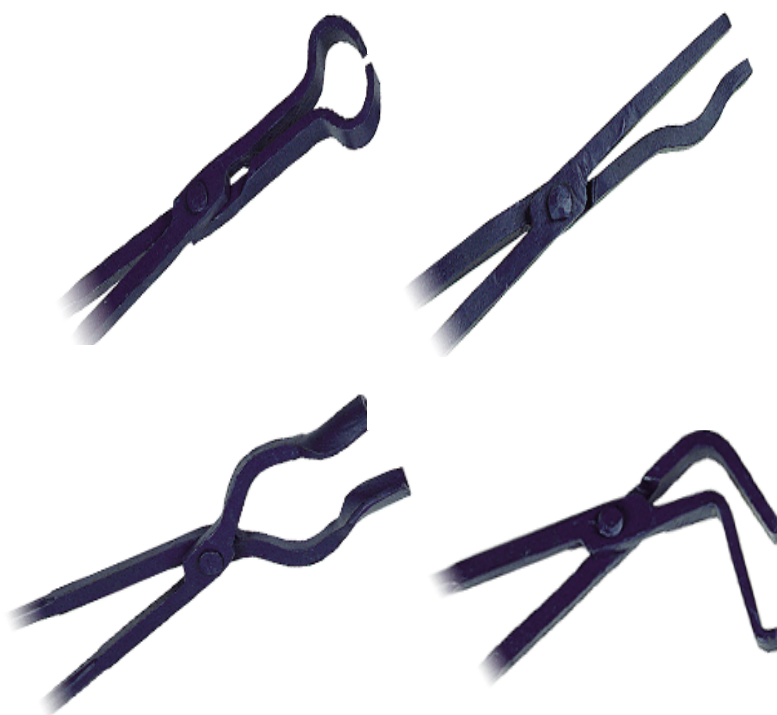


Figura 1.7: Tenazas de trabajo.

Estas formas pueden ser cuadrada, redonda o plana; según el tipo de pieza que se desea sujetar. La boca de la tenaza debe estar bien conformada, para asegurar una sujeción firme de las piezas, evitar marcarlas y además debe permitir que el líquido del temple, tome contacto con toda la superficie de la pieza.

Los brazos tienen diferentes longitudes y sirven para evitar que la persona que esté manipulando las piezas, sufra quemaduras o accidentes provocados por un contacto directo con un cuerpo caliente. Alrededor de los brazos se debe colocar unos anillos de fijación que permite a la boca ceñirse sobre la pieza sujetándola firmemente, esto se consigue desplazando el anillo sobre los brazos.

Ganchos: Estos elementos están constituidos de acero de bajo carbono, tienen sus extremos doblados en forma de alojamiento, que permite sujetarlos con las manos y el otro extremo, tiene forma curvada y sirve para agarrar las piezas especialmente cuando estas se encuentran amarradas con alambre. La dimensión de los ganchos es variada, normalmente miden de 0,30 a 1,50 metros de longitud, las puntas curvadas poseen formas y dimensiones que varían de acuerdo a las necesidades.

Cucharas: Las cucharas sirven para colocar y retirar las sales, o remover escorias de los crisoles en los hornos de baño, están construidas de acero y tienen diversas formas y tamaños. Las cucharas usadas para remover escorias son perforadas, presentando la forma de un colador o espumera. Las cucharas para manipular sales, tienen a veces situado el cabo a 90° con respecto al pico de la cuchara para facilitar su manejo. Estos elementos mencionados pueden considerarse palancas.

Cajas: Estas, se usan en la cementación con sustancias sólidas, o en los tratamientos en los que es necesario proteger las piezas contra la descarburación, se usan diversas formas y tamaños de cajas, siendo las más comunes las cajas de forma rectangular y circular. Para facilitar la penetración del calor y una temperatura uniforme, es conveniente que las cajas se apoyen en patas para mantener el fondo de las mismas separadas del piso del horno unos 20 a 30 milímetros aproximadamente. Todas estas cajas están provistas de una tapa la cual permite cerrarlas semi – herméticamente.

Dispositivos de guía y sujeción: Las piezas que van a ser tratadas térmicamente en hornos de baño o de atmósfera gaseosa, se colocan en dispositivos especiales que tienen por objeto sujetarlas y posicionarlas, para evitar deformaciones durante el calentamiento y el enfriamiento.

Existen diversos tipos de dispositivos de sujeción, de acuerdo a la forma y tamaño de las piezas que van a colocarse en ellos, y según el tipo de horno utilizado en el tratamiento. En los hornos de atmósfera gaseosa, los dispositivos de sujeción de las piezas, generalmente se apoyan sobre un soporte guía que posee la cámara del horno.

En algunos casos, el mismo dispositivo de sujeción que se utiliza para el calentamiento, sirve para el enfriamiento, en esos casos se sumerge todo el conjunto en el baño; en otros casos se utiliza otros dispositivos, únicamente para enfriar, como por ejemplo, la prensa “Klingelnberg”, que comprime las piezas mediante matrices con orificios y / ó ranuras, por las cuales se inyecta uniformemente el fluido de refrigeración, este sistema se usa para evitar deformaciones en piezas seriadas.

Alicates y tenazas de corte: Estos elementos sirven para cortar el alambre con el que se amarran las piezas que se tratan térmicamente.

Alambre para amarre: Este elemento se utiliza más que todo para amarrar las piezas para tener una mayor facilidad de manipulación de las piezas al momento de ser tratadas térmicamente.

2. Requerimientos mínimos de equipos de trabajo.

Para todo departamento o división de tratamientos térmicos, el mínimo de equipos que se requiere para hacer un trabajo de buena calidad es el siguiente.

- 1 Horno de mufla para temple (rango máximo de 1200 °C).
- 1 Horno de mufla con circulación forzada de aire (rango máximo de 700°C).
- 1 Estanque para almacenaje de agua sin mezcla.
- 1 Estanque para almacenaje de agua con sal.
- 1 Estanque para almacenaje de agua con aceite.
- 1 Mesa de trabajo.
- 1 Cepillo para limpieza y pulido de piezas.
- 1 Esmeril.
- 1 Medidor de dureza Rockwell.

3. Datos de los aceros del mercado nacional.

Tabla 3.1: Normas equivalentes aproximadas de los aceros caracterizados.

Acero.	UNE	DIN	AFNOR	ANSI	BS 4956	UNI	AISI SAE
Cold roll steel	F-15	CK-18	—	—	—	—	1018
1022.	F-15	CK-22	—	—	—	—	1022
St-52.	F-1515	20Mn5	E36-3	1.0580	Fe510D1F	Fe510CFN	1024
F-1140.	F-1140	CK-45	XC-45	1.1730	080M46	C-45	1045
F-1252.	F-1252	42CrMo4	42CD4	1.7225	708M40	42CrMo4	4140
F-1270.	F-1270	30NiCrMo7	—	—	—	35NiCrMo7	4340
F-5220.	F-5220	100MnCrW4	90MnWCV5	1.2510	—	—	O1
Bohler k - 460.	F-5220	100MnCrW4	90MnWCV5	1.2510	—	—	O1
Molders 1.2344	F-5318	X40CrMoV51	Z40CDV5	1.2324	BH13	X40CrMoV511KU	H13
Acero plata.	—	115CrV3	Y2 90	—	BW1A	115CrV3	W1

Tabla 3.2: Composición química aproximada de los aceros caracterizados.

Acero.	C. %	Mn. %	P. %	S. %	Si. %	Ni. %	Cr. %	Mo. %	V. %	W %
Cold roll steel.	0,18	0,75	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
1022.	0,22	0,85	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
St – 52.	0,24	1,50	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
F – 1140.	0,45	0,75	<0,04	<0,05	0,25	—	—	—	—	—
F – 1252.	0,41	0,75	—	—	0,25	—	1,00	0,20	—	—
F – 1270.	0,35	0,70	—	—	0,25	1,80	0,80	0,25	—	—
F – 5220.	0,95	1,10	—	—	0,25	—	0,50	—	0,10	0,50
Bohler k – 460.	0,95	1,10	—	—	0,25	—	0,50	—	0,12	0,55
Molders 1.2344	0,39	0,40	—	—	1,00	—	5,30	1,40	1,00	—
Acero plata.	1,18	—	—	—	—	—	0,7	—	0,1	—

Tabla 3.3: Características aproximadas de tratamientos térmicos de los aceros caracterizados según catálogos de fabricantes.

Acero.	Recocido (°C).	Temple (°C).	Medio Enfriante.	Dureza HRC.	Estado de suministro.
Cold Roll Steel.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Lámina y pletina. 111-149 HB
1022.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Barra sólida. 111-149 HB
St – 52.	855-900	—	—	—	Estado bruto de laminación. Barra perforada. 146-210HB.
F – 1140.	670-710	830-860	Agua.	48-60	Estado bruto de laminación. Barra sólida. 180-228 HB.
F – 1252.	680-720	820-860	Aceite.	57-55	Estado recocido / bonificado Barra sólida. 174 – 232 / 223-340 HB.
F – 1270.	640-670	820-840	Aceite.	55-53	Estado recocido / bonificado. Barra sólida. 217 – 240 / 229-340 HB.
F – 5220.	750-780	780-840	Aceite.	60-62	Estado recocido globular. Barra sólida y pletina. 195-245 HB.
Bohler k – 460.	700-750	780-820	Aceite.	63-65	Estado recocido globular. Lámina y pletina. 198-248 HB.
Molders 1.2344.	760-820	1020-1050	Aceite caliente	53-38	Estado recocido globular. Barra sólida. 197-241 HB
Acero plata.	760-780	770-790	Agua.	63-66	Estado recocido globular. Barra sólida. 180-285 HB

4. Procedimiento de temple de aceros.

El proceso de temple se da en varias etapas, estas etapas son:

- 4.1. Precalentamiento.
- 4.2. Calentamiento a temperatura crítica y mantenimiento.
- 4.3. Temple en el correspondiente medio de enfriamiento.

4.1. Precalentamiento.

El precalentamiento se realiza de la siguiente forma:

- 4.1.1. Introduzca las piezas dentro del horno de temple.
- 4.1.2. Encienda el horno de temple y regule la temperatura del horno de manera tal que la temperatura llegue a los 600 °C.
- 4.1.3. Una vez que se alcance los 600 °C, se debe mantener la pieza a esta temperatura durante al menos 30 minutos.

4.2. Calentamiento a temperatura crítica y mantenimiento.

Una vez transcurrido el tiempo de precalentamiento se procede a los siguientes pasos:

- 4.2.1. Se eleva la temperatura del horno de temple hasta la temperatura crítica y se mantiene durante el tiempo requerido.
- 4.2.2. Una vez transcurrido el tiempo requerido para la pieza, se procede a tirar las piezas al medio de enfriamiento que corresponde según el tipo de acero.
- 4.2.3. Una vez que la pieza está dentro del medio de enfriamiento se procede a agitar enérgicamente la pieza hasta que se enfríe completamente.

Observaciones:

1. Las puertas de los hornos deben permanecer abiertas la menor cantidad de tiempo posible para evitar que los cambios bruscos de temperatura sobre las resistencias no dañen las mismas.
2. El tiempo de mantenimiento de la pieza a la temperatura crítica se puede determinar mediante las tablas del proceso de temple que se encuentra en la sección 7 de este manual.
3. Cuando las piezas sean alargadas y midan más de 30 centímetros, se debe procurar que las mismas entren verticales al medio de enfriamiento para evitar que se distorsionen o deformen, la agitación en este tipo de piezas debe realizarse de abajo hacia arriba y no hacia los lados.
4. Cuando las piezas son muy grandes y gruesas las piezas también pueden entrar al baño verticalmente solo que la agitación si se puede hacer hacia los lados.
5. El acero 1045 se temple en agua con sal, la mezcla debe tener 10% de sal común (Cloruro de Sodio). El acero W1 (acero plata) se temple en agua sin sal, los demás aceros se templan en aceite a temperatura ambiente excepto el acero H13 que se temple en aceite caliente.
6. Una vez fría la pieza después del temple se procede a limpiarse en el cepillo las piezas.
7. Todos los aceros deben ser protegidos contra la descarburación, empaquetando las piezas en cajas con virutas de hierro fundido o con un poco de cantidad carbón o aceite.

5. Procedimiento de revenido de aceros.

Una vez finalizado el proceso de temple de piezas se procede a realizar el respectivo proceso de revenido de las mismas, siempre; toda pieza templada debe ser revenida.

El revenido se ejecuta en los siguientes pasos:

5.1. Introduzca las piezas dentro del horno.

5.2. Encienda el horno y regule la temperatura al valor deseado.

5.3. Accione el sistema de circulación forzada.

5.4. La pieza se mantendrá a esa temperatura el tiempo requerido según el tamaño de la pieza y el tipo de acero.

5.6. Retire las piezas del horno y dejarlas enfriando las mismas al aire calmo.

5.7. Apague el horno.

Observaciones:

1. El tiempo de revenido mínimo para todos los casos es de dos horas.

2. La temperatura de revenido se selecciona en función de la dureza que se quiera dar a la pieza, esta temperatura se puede seleccionar mediante las curvas de revenido que se presentan en la sección 8 de este manual.

3. El medio de enfriamiento más adecuado para las piezas revenidas es el aire tranquilo ya que los aceros se destensan más cuando el medio genera un enfriamiento más lento, el aceite se puede usar pero no es le mejor medio.

6. Procedimiento de cementado de aceros.

El proceso de cementación se realiza en varias etapas, estas etapas son:

- 6.1. Preparación de la mezcla.
- 6.2. Preparación de la caja.
- 6.3. Cierre hermético de la caja.
- 6.4. Cementación de las piezas.

6.1. Preparación de la mezcla.

- 6.1.1. Muela el carbón hasta dejarlo con grano fino.
- 6.1.2. Coloque en un recipiente un 30% en peso de la mezcla a realizar de bicarbonato de sodio.
- 6.1.3. Coloque el 70% en peso de la mezcla a realizar del carbón que se molió al inicio.
- 6.1.4. Mezcle hasta formar una sustancia sólido visiblemente uniforme, una vez hecha la mezcla proceda a preparar la caja.

6.2. Preparación de la caja.

- 6.2.1. Extienda en el fondo de la caja una capa de 3 centímetros de espesor de la mezcla cementante preparada en la etapa anterior.
- 6.2.2. Coloque las piezas a cementar en la caja, distanciándolas 2 centímetros unas de otras.
- 6.2.3. Extienda sobre las piezas otra capa de la mezcla cementante hasta cubrir completamente todas las piezas a tratar.
- 6.2.4. Coloque la tapa de la caja y golpee suave y uniformemente con un martillo, una vez concluido este paso proceda a cerrar herméticamente la caja.

6.3. Cierre hermético de la caja.

6.3.1. Prepare una mezcla de cinco partes de arcilla refractaria y un parte de polvo esmeril.

6.3.2. Mezcle bien los dos elementos, y agregue agua hasta formar una masa pastosa.

6.3.3. Coloque una capa de 3 centímetros de la mezcla refractaria hecha, en las uniones de la tapa con la caja, hacer esto hasta conseguir un sello hermético, una vez hecho esto proceda a cementar la pieza.

6.4. Cementación de las piezas.

6.4.1. Introduzca la caja al horno.

6.4.2. Regule la temperatura hasta el valor de temperatura de la cementación (925 °C).

6.4.3. Mantener dentro del horno, el tiempo requerido por el tipo de acero, el tipo de cementante usado y la profundidad de la capa de cementación deseada, una vez culminado este tiempo de mantenimiento dentro del horno, proceda al siguiente paso.

6.4.4. Retire la caja del horno.

6.4.5. Abra la caja y saque las piezas de la caja.

6.4.6. Deje enfriar las piezas al aire un momento de manera que siempre estén al rojo vivo, cuando comience a perder el color rojo se procede a realizar el siguiente paso.

6.4.7. Temple la pieza en aceite.

6.4.8. Una vez fría la pieza proceda a revenir las piezas tal y como está establecido en el procedimiento de la sección 5 de este manual.

Observaciones:

1. En el cementado la dureza es superficial, el núcleo de la pieza es suave.
2. En el cementado la dureza superficial se produce por la difusión del carbono en la superficie de la pieza a tratar.
3. La capa de carbón que se forme en la superficie dependerá directamente del tiempo de tratamiento, es decir, a mayor tiempo de tratamiento la superficie tendrá una mayor capa de dureza superficial.
4. Después del cementado las piezas pueden ser templadas y revenidas o sólo revenidas si en el cementado se ha practicado el temple directo.
5. El espesor de capa en función del tiempo se puede determinar en las tablas de la sección 9 de este manual.

7. Tablas para el proceso de temple.

Tabla 7.1: Coeficientes de forma “k” para cálculo de tiempos de mantenimiento para diferentes piezas.

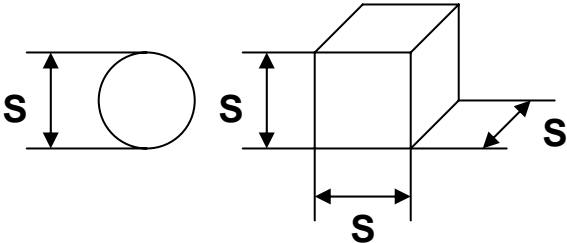
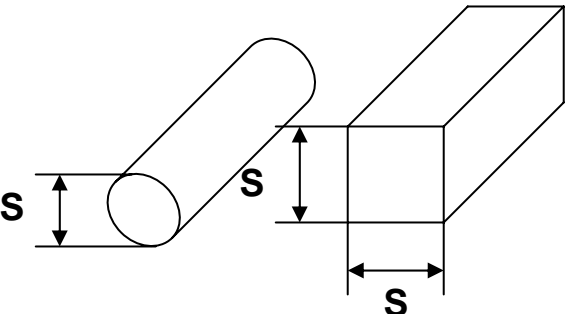
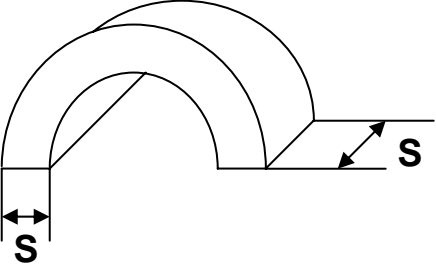
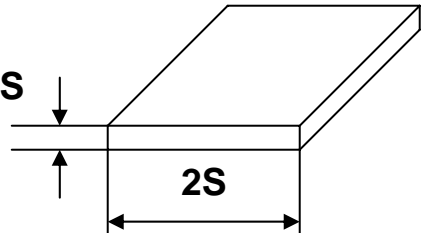
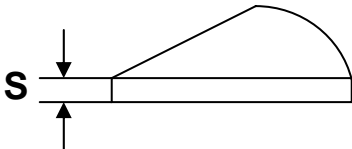
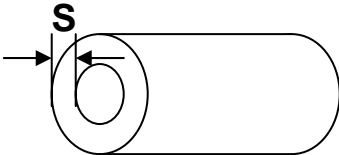
Forma de la pieza.	Coeficiente de forma k.
	0,7
	1,0
	1,5
	1,5

Tabla 7.1: Coeficientes de forma “k” para cálculo de tiempos de mantenimiento para diferentes piezas (continuación).

Forma de la pieza.	Coeficiente de forma k.
	2
	2 Tubos cortos y abiertos. 4 Tubos largos y cerrados por un lado.

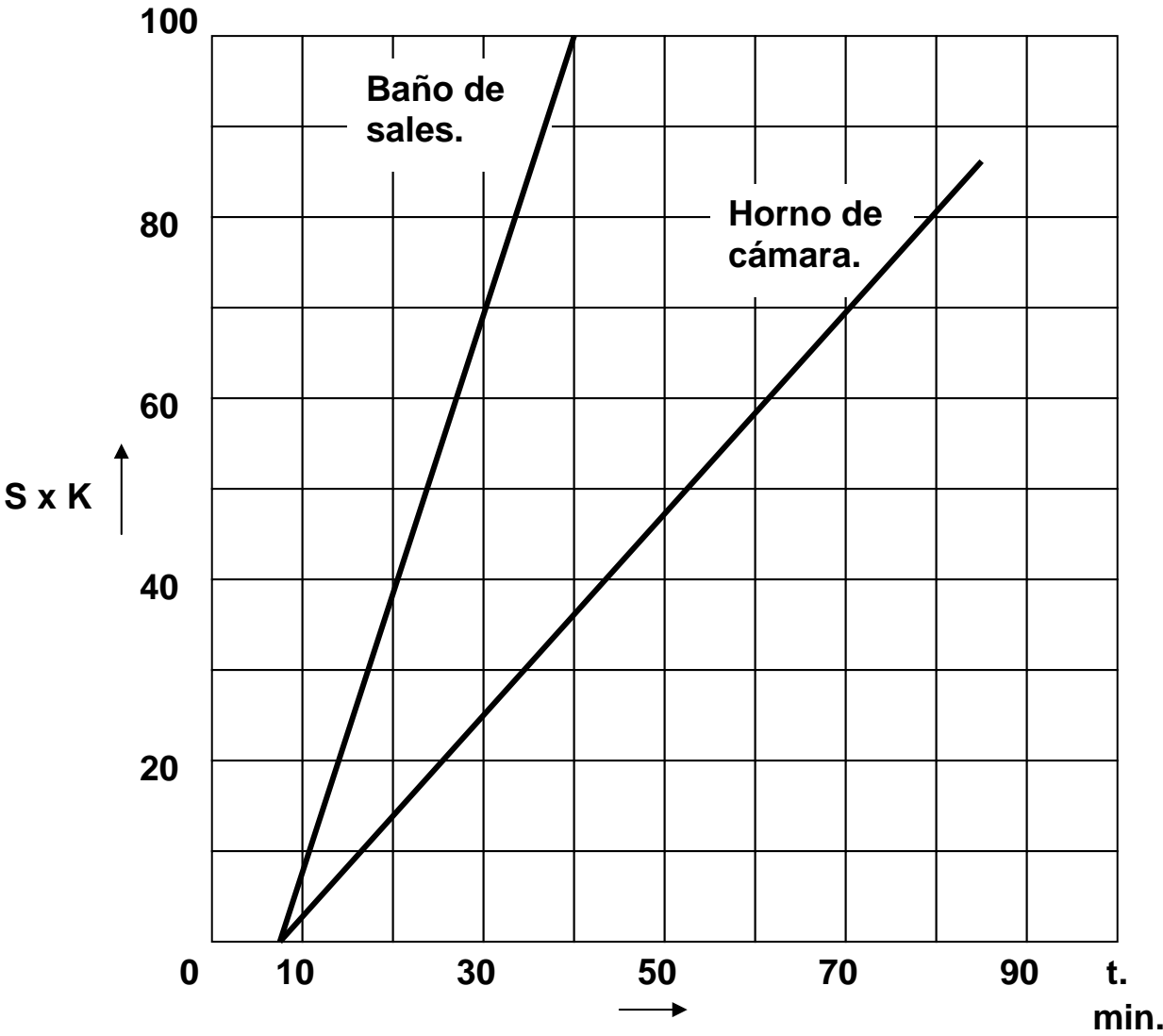


Figura 7.: Duración del mantenimiento en el temple.

Tabla 7.2: Cálculo de espesores por factores de forma para la determinación del tiempo de mantenimiento a temperatura crítica.

S (cm).	2s	S * k1	S * k2	S * k3	S * k4	S * k5	2S * k3
1,0	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	4,0	3,0
2,0	4,0	1,4	2,0	3,0	4,0	8,0	6,0
3,0	6,0	2,1	3,0	4,5	6,0	12,0	9,0
4,0	8,0	2,8	4,0	6,0	8,0	16,0	12,0
5,0	10,0	3,5	5,0	7,5	10,0	20,0	15,0
6,0	12,0	4,2	6,0	9,0	12,0	24,0	18,0
7,0	14,0	4,9	7,0	10,5	14,0	28,0	21,0
8,0	16,0	5,6	8,0	12,0	16,0	32,0	24,0
9,0	18,0	6,3	9,0	13,5	18,0	36,0	27,0
10,0	20,0	7,0	10,0	15,0	20,0	40,0	30,0
11,0	22,0	7,7	11,0	16,5	22,0	44,0	33,0
12,0	24,0	8,4	12,0	18,0	24,0	48,0	36,0
13,0	26,0	9,1	13,0	19,5	26,0	52,0	39,0
14,0	28,0	9,8	14,0	21,0	28,0	56,0	42,0
15,0	30,0	10,5	15,0	22,5	30,0	60,0	45,0
16,0	32,0	11,2	16,0	24,0	32,0	64,0	48,0
17,0	34,0	11,9	17,0	25,5	34,0	68,0	51,0
18,0	36,0	12,6	18,0	27,0	36,0	72,0	54,0
19,0	38,0	13,3	19,0	28,5	38,0	76,0	57,0
20,0	40,0	14,0	20,0	30,0	40,0	80,0	60,0
21,0	42,0	14,7	21,0	31,5	42,0	84,0	63,0
22,0	44,0	15,4	22,0	33,0	44,0	88,0	66,0
23,0	46,0	16,1	23,0	34,5	46,0	92,0	69,0
23,0	46,0	16,1	23,0	34,5	46,0	92,0	69,0
24,0	48,0	16,8	24,0	36,0	48,0	96,0	72,0
25,0	50,0	17,5	25,0	37,5	50,0	100,0	75,0
26,0	52,0	18,2	26,0	39,0	52,0	104,0	78,0
27,0	54,0	18,9	27,0	40,5	54,0	108,0	81,0
28,0	56,0	19,6	28,0	42,0	56,0	112,0	84,0
29,0	58,0	20,3	29,0	43,5	58,0	116,0	87,0

Tabla 7.2: Cálculo de espesores por factores de forma para la determinación del tiempo de mantenimiento a temperatura crítica (continuación).

S (cm).	2s	S * k1	S * k2	S * k3	S * k4	S * k5	2S * k3
30,0	60,0	21,0	30,0	45,0	60,0	120,0	90,0
31,0	62,0	21,7	31,0	46,5	62,0	124,0	93,0
32,0	64,0	22,4	32,0	48,0	64,0	128,0	96,0
33,0	66,0	23,1	33,0	49,5	66,0	132,0	99,0
34,0	68,0	23,8	34,0	51,0	68,0	136,0	102,0
35,0	70,0	24,5	35,0	52,5	70,0	140,0	105,0
36,0	72,0	25,2	36,0	54,0	72,0	144,0	108,0
37,0	74,0	25,9	37,0	55,5	74,0	148,0	111,0
38,0	76,0	27,3	39,0	58,5	78,0	156,0	117,0
39,0	78,0	28,0	40,0	60,0	80,0	160,0	120,0
40,0	80,0	28,7	41,0	61,5	82,0	164,0	123,0
41,0	82,0	29,4	42,0	63,0	84,0	168,0	126,0
42,0	84,0	30,1	43,0	64,5	86,0	172,0	129,0
43,0	86,0	30,8	44,0	66,0	88,0	176,0	132,0
44,0	88,0	31,5	45,0	67,5	90,0	180,0	135,0
45,0	90,0	32,2	46,0	69,0	92,0	184,0	138,0
46,0	92,0	32,9	47,0	70,5	94,0	188,0	141,0
47,0	94,0	33,6	48,0	72,0	96,0	192,0	144,0
48,0	96,0	34,3	49,0	73,5	98,0	196,0	147,0
49,0	98,0	35,0	50,0	75,0	100,0	200,0	150,0
50,0	100,0	35,7	51,0	76,5	102,0	204,0	153,0
51,0	102,0	36,4	52,0	78,0	104,0	208,0	156,0
52,0	104,0	37,1	53,0	79,5	106,0	212,0	159,0
53,0	106,0	37,8	54,0	81,0	108,0	216,0	162,0
54,0	108,0	38,5	55,0	82,5	110,0	220,0	165,0
55,0	110,0	27,3	39,0	58,5	78,0	156,0	117,0

Observación: $k_1 = 0,7$; $k_2 = 1$; $k_3 = 1,5$; $k_4 = 2$; $k_5 = 4$. La forma geométrica correspondiente se puede ver en la tabla 7.1.

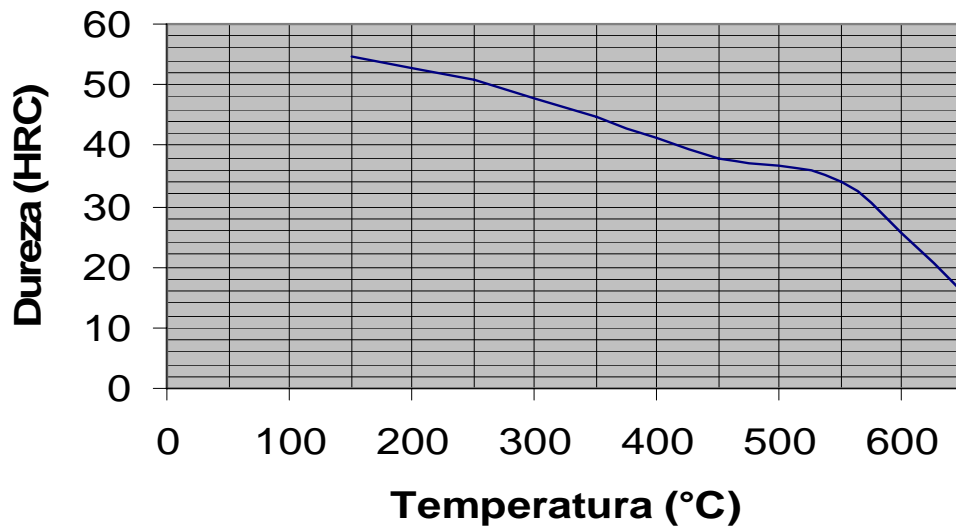
Tabla 7.3: Tiempo de mantenimiento a la temperatura crítica para piezas conforma distinta a las formas mostradas en la tabla 7.1.

Espesor (cm).	Tiempo (min).	Espesor (cm).	Tiempo (min).
1,0	20,5	22,0	41,0
2,0	21,0	23,0	41,5
3,0	21,5	23,0	41,5
4,0	22,0	24,0	42,0
5,0	22,5	25,0	42,5
6,0	23,0	26,0	43,0
7,0	23,5	27,0	43,5
8,0	24,0	28,0	44,0
9,0	24,5	29,0	44,5
10,0	25,0	30,0	45,0
11,0	25,5	31,0	45,5
12,0	26,0	32,0	46,0
13,0	26,5	33,0	46,5
14,0	27,0	34,0	47,0
15,0	27,5	35,0	47,5
16,0	28,0	36,0	48,0
17,0	28,5	37,0	48,5
18,0	29,0	38,0	49,0
19,0	29,5	39,0	49,5
20,0	30,0	40,0	50,0
21,0	30,5	41,0	50,5

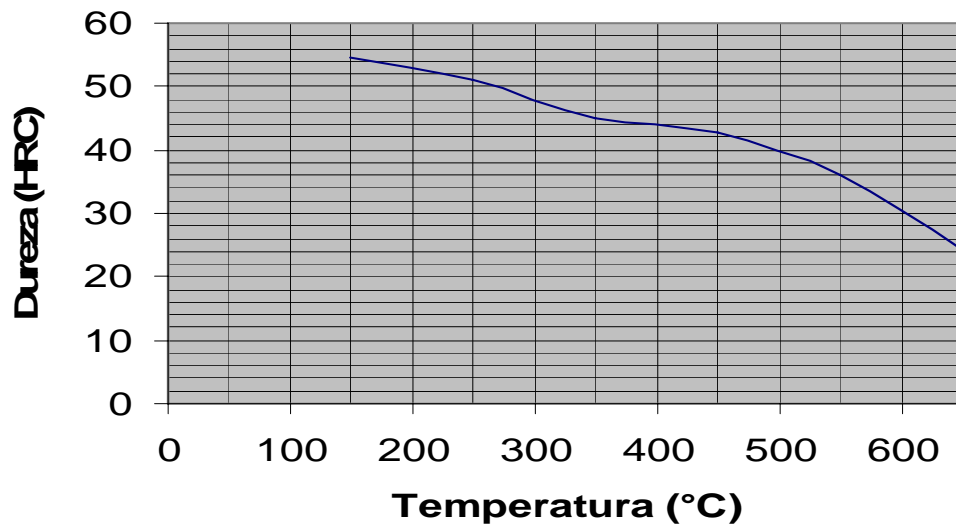
8. Curvas para el proceso de revenido.

Para los aceros del mercado se presentan las curvas de revenido.

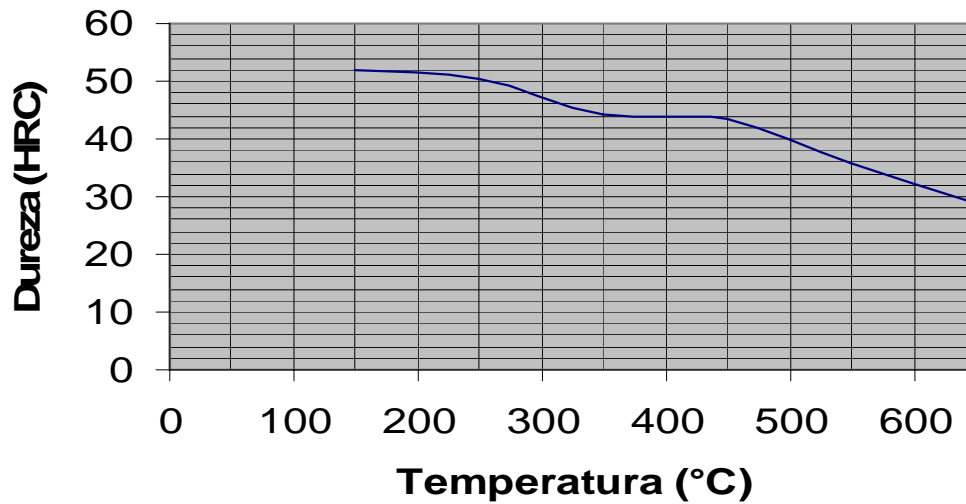
**Curva experimental de revenido
del acero F - 1140 (1045).**



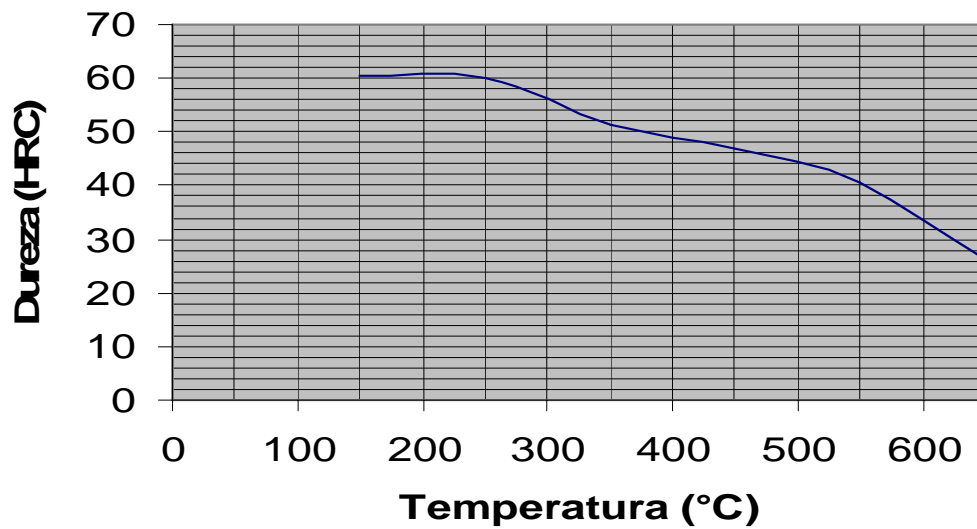
**Curva experimental de revenido
del acero F - 1252 (4140).**



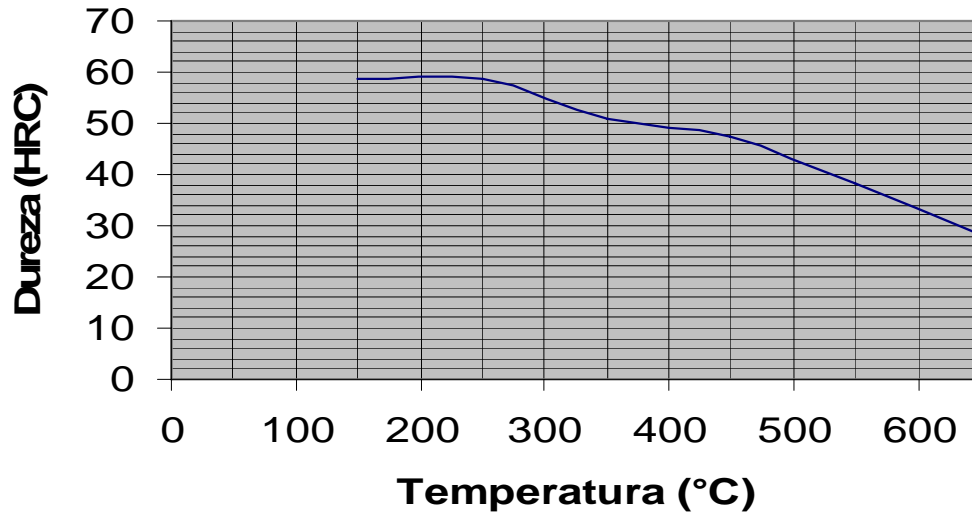
Curva experimental de revenido del acero F -1270 (4340).



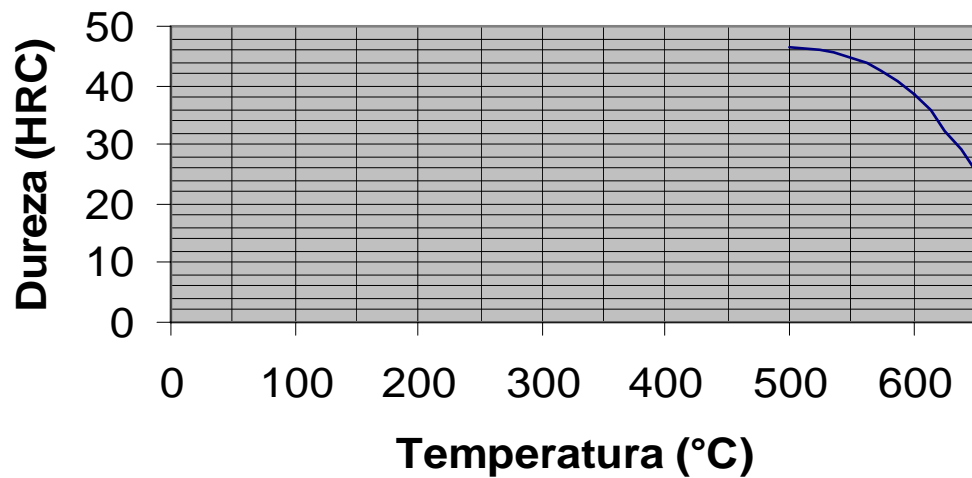
Curva experimental de revenido del acero F - 5220 (O1).



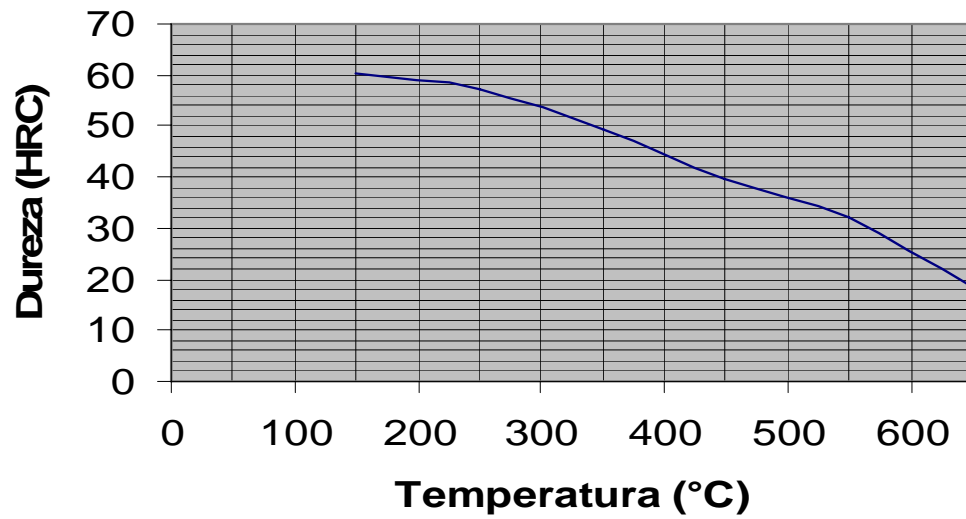
Curva experimental de revenido del acero Bohler k - 460 (O1).



Curva experimental de revenido del acero Molders 1.2344 (H13).



Curva experimental de revenido del acero W1 (Acero Plata).










9. Tablas para el proceso de cementado.





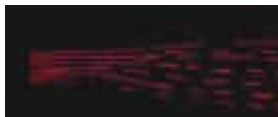


(seg).	Tiempo (t)		Espesor de capa. (mm).
	(min).	(hrs).	
1800,0	30	½	0,2390
3600,0	60	1	0,3380
5400,0	90	1 ½	0,4139
7200,0	120	2	0,4780
9000,0	150	2 ½	0,5344
10800,0	180	3	0,5854
12600,0	210	3 ½	0,6323
14400,0	240	4	0,6760
16200,0	270	4 ½	0,7170
18000,0	300	5	0,7558
19800,0	330	5 ½	0,7926
21600,0	360	6	0,8279
23400,0	390	6 ½	0,8617
25200,0	420	7	0,8942
27000,0	450	7 ½	0,9256
28800,0	480	8	0,9560
30600,0	510	8 ½	0,9854
32400,0	540	9	1,0140
34200,0	570	9 ½	1,0417
36000,0	600	10	1,0688

10. Control de calidad y la prueba de chispa.

Identificación de aceros según prueba de chispa.

Morfología.	Imagen.	Tipo de acero.	Acero AISI.	Composición %
Ramillete con espinas, y puntas de lanza color rojo		Acero templado y revenido	4140	0,42 C 1,1 Cr 0,2 Mo
Líneas continuas, algunas espinas, formado por estallidos de Carbono		Acero endurecido		0,21 C 1,3 Mn 1,2 Cr
Líneas continuas, más espinas se formaron por estallidos de Carbono		Acero al carbono para herramientas	1045	0,45 C 0,3 Si 0,7 Mn
Muchos estallidos de Carbono que empiezan al pie del haz, muchos ramos		Acero al carbono para herramientas	W1	1,05 C 0,2 Si 0,2 Mn
Antes de los estallidos de Carbono se incrementa la luz en el flujo primario. Muchos ramos pequeños		Acero aleado con Mn-Si	S4	0,60 C 1,0 Si 1,1 Mn 0,3 Cr
Flujo de líneas amarilla, aclarando en el centro, formando espinas en los extremos		Acero para herramientas aleado Mn	02	0,90 C 2,0 Mn 0,4 Cr 0,1 V
Pocos estallidos finos de Carbono seguidos por club liso luminoso		Acero para herramientas aleado W	S1	0,60 C 0,6 Si 1,1 Cr 0,2 V 2,0 W

Identificación de aceros según prueba de chispa (continuación).

Morfología.	Imagen.	Tipo de acero.	Acero AISI.	Composición %
Un flujo delgado y lineal, el cuadro de la chispa vivo, líneas discontinuas en las cabezas		Acero para herramientas aleado Cr-W	O1	1,05 C 1,0 Mn 1,0 Cr 1,2 W
Haz corto Templado: con pocos Endurecido: con muchos ramos luminosos		Acero para herramientas aleado con Cr carbono alto, ledeburita alta	D2	1,55 C 12,0 Cr 0,7 Mo 1,0 V
El flujo de líneas continuas, alguno los estallidos de carbono, línea coloreada de naranja en la cabeza		Acero para trabajo en caliente, alta aleación	H13	0,40 C 1,0 Si 5,3 Cr 1,4 Mo 1,0 V
El flujo de líneas rojo oscuro con brillo en la punta de la lanza, pocas espigas		Acero de alta velocidad	M2	0,90 C 4,1 Cr 5,0 Mo 1,9 V 6,4 W
Líneas del flujo rojas, punteadas oscuras con brillos en las cabezas de la línea		Acero de alta velocidad	T42	1.23 C 4,1 Cr 3,8 Mo 3,3 V 10,0 W 10,5 Co
Haz corto con espina como los estallidos de carbono		Acero inoxidable	420	0,40 C 13,0 Cr
Flujo continuo, línea sin los estallidos de carbono		Acero inoxidable	304	<0,07 C 18,5 Cr 9,0 Ni